

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA  
COMPUTAÇÃO**

**WILNICE TAVARES REIS OLIVEIRA**

**UTILIZANDO INTEGRAIS FUZZY EM TOMADA DE  
DECISÃO MULTICRITÉRIO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação

Dr. Paulo Sérgio da Silva Borges

Florianópolis, abril 2003

# **UTILIZANDO INTEGRAIS FUZZY EM TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

**WILNICE TAVARES REIS OLIVEIRA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação Área de Concentração (Sistemas de Computação) e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Banca Examinadora

---

Prof. João Bosco Manguiera Sobral, Dr.

---

Prof. Paulo Sergio da Silva Borges, Dr.

---

Prof. Jovelino Falqueto, Dr.

---

Prof. Luis Fernando Jacintho Maia, Dr.

## DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho aos meus pais, Wilson e Larenice, e aos meus irmãos Wanilce, Wanuce e Salomão, que me incentivavam todos os dias, entendendo os momentos de ausência, ou mesmo presente, diante do computador, quando não pude dar-lhes atenção.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que orienta meu caminho e me ajuda vencer desafios. Que a sua referência esteja sempre presente em meu coração.

Ao ilustre orientador desta pesquisa e amigo, o professor Paulo Sérgio da Silva Borges, pela direção, pelo incentivo, e por poder compartilhar de sua grandiosa experiência nas áreas de Inteligência Artificial e desenvolvimento de tecnologias.

Aos colegas da turma, pelas amizades que se formaram durante o nosso convívio, pela troca de experiências e conhecimentos.

Aos amigos da Coordenação Acadêmica, professor João Bosco Manguiera Sobral, do CPGCC/UFSC, e ao professor Cristiano Maciel, da UNIRONDON, pela troca de informações técnicas valiosas, pelo companheirismo e pela solidariedade.

A amiga Alinni, pelo apoio ao estudo da matemática complementada na Integral *Fuzzy*.

Ao professor João Paulo Ribas, pelo tempo e auxílio dispendidos na finalização desta pesquisa.

Aos colegas do CEFET-MT, em especial aos professores e amigos Djalma e Mônica, que não hesitavam em me apoiar nas horas de dificuldades.

A todos os colegas que conquistei, pertencentes ao Departamento de Engenharia Sanitária (UFMT), inclusive à amiga, Michely Libos, pelo apoio sempre.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	OBJETIVOS .....	2
1.1.1.	Objetivo Geral.....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.2.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	2
<b>2.</b>	<b>SISTEMAS DE SUPORTE A DECISÕES - SSD.....</b>	<b>4</b>
2.1.	A TOMADA DE DECISÃO .....	4
2.2.	SSD - UMA VISÃO GERAL .....	5
2.2.1.	O que é o Suporte à Decisão? .....	6
2.3.	DECISÃO E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS .....	9
2.3.1.	Fatores Humanos.....	10
2.3.2.	Processo para a Tomada de Decisões .....	11
2.3.3.	Critérios para Tomada de Decisão .....	12
2.3.4.	Sistema de Suporte à Decisão em Grupo - SSDG .....	12
2.4.	ESTRATÉGIAS PARA O PROJETO DE UM SSD .....	13
2.4.1.	Papéis e Atores.....	14
2.4.2.	Arquitetura de Sistemas de Suporte à Decisão .....	14
<b>3.</b>	<b>INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO APOIO AOS SSD .....</b>	<b>19</b>
3.1.	VISÃO SOBRE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	19
3.2.	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL UNIDA AOS SSD.....	20

3.3.	TECNOLOGIAS E SISTEMAS .....	21
3.3.1.	Abordagem Conexcionista.....	21
3.3.2.	Abordagem Evolutiva .....	24
3.3.3.	Abordagem Cognitiva .....	27
3.4.	TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY .....	30
3.4.1.	Operações Básicas e Propriedades Fuzzy .....	31
3.4.2.	Operações Reservadas aos Conjuntos Fuzzy .....	33
3.4.3.	Variáveis Lingüísticas.....	33
3.4.4.	Proposição Fuzzy .....	34
3.4.5.	Inferência Fuzzy.....	36
3.5.	SISTEMAS ESPECIALISTAS - SE .....	38
3.5.1.	Classificação dos SE .....	39
3.5.2.	Características de um SE.....	40
3.5.3.	Benefícios de um Programa Baseado no Conhecimento .....	41
3.5.4.	Aplicações de um SE .....	42
3.5.5.	Considerações sobre SE .....	42
3.6.	ADAPTANDO SISTEMA ESPECIALISTA AO SSD.....	43
<b>4.</b>	<b>APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO .....</b>	<b>45</b>
4.1.	ANÁLISE DE DECISÃO .....	45
4.1.1.	Análise de Decisão Multicritério .....	45
4.1.2.	A Tomada de Decisão Multicritério.....	46

4.2.	A ORIGEM DA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO .....	47
4.2.1.	As Correntes Científicas .....	48
4.2.2.	Conceitos Fundamentais .....	52
4.3.	DOMINÂNCIA E O CONJUNTO PARETO ÓTIMO .....	54
4.4.	AGREGAÇÃO DE OBJETIVOS .....	55
4.5.	A FUNÇÃO MULTICRITÉRIO DE DECISÃO .....	55
4.6.	AS PREFERÊNCIAS DOS DECISORES .....	56
4.7.	ESTRUTURAÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA .....	57
4.8.	METODOLOGIA MULTICRITÉRIO DE NEGOCIAÇÃO E DECISÃO EM GRUPO	58
4.9.	MÉTODOS MULTICRITÉRIOS DE DECISÃO .....	60
4.9.1.	Técnicas que Geram o Conjunto das Soluções não Dominadas .....	61
4.9.2.	Técnicas que Utilizam uma Articulação Antecipada das Preferências .....	61
4.9.3.	Técnicas que Utilizam uma Articulação Progressiva das Preferências .....	62
4.10.	FUNÇÕES DE AGREGAÇÃO .....	62
4.10.1.	Média Ponderada .....	63
4.10.2.	Ordered Weighted Averaging - OWA .....	64
4.10.3.	Integral Choquet .....	64
4.10.4.	Integral Sugeno .....	65
4.10.5.	Operadores (Máximo e Mínimo) .....	66

4.11.	INTEGRAL FUZZY – APLICAÇÃO EM PROBLEMAS MULTICRITÉRIOS .....	67
4.11.1.	Exemplo de Aplicação .....	69
4.11.2.	Desvantagens do Método .....	71
4.11.3.	Cálculo da Integral Fuzzy Modificada.....	71
<b>5.</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>74</b>
5.1.	RIO CUIABÁ / PERÍMETRO URBANO .....	74
5.2.	CRITÉRIOS UTILIZADOS NO MODELO.....	76
5.3.	MODELO PROSPECTIVO USANDO AS INTEGRAIS FUZZY .....	76
5.4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	81
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO.....</b>	<b>89</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura típica de um SSD.....	6
Figura 2 - Característica de um SSD, segundo TURBAN. ....	8
Figura 3 - Arquitetura funcional de um SSD.....	15
Figura 4 - Arquitetura instrumental de um SSD.....	16
Figura 5 - Arquitetura expandida de Guariso e Whertner. ....	17
Figura 6 - Estrutura de uma rede neural disposta em duas camadas. ....	22
Figura 7 - Representação da função triangular na lógica difusa.....	29
Figura 8 - Representação da função trapezoidal na lógica difusa. ....	29
Figura 9 - Diferentes conjuntos fuzzy de pertinência dentro de um mesmo universo x. ....	30
Figura 10 – Exemplo de variável lingüística. ....	33
Figura 11 - Mecanismo de inferência fuzzy. ....	38
Figura 12 - Estrutura hierárquica do processo decisório, segundo KEENEY e RAIFFA (1976). ....	52
Figura 13 - A genérica árvore da decisão. ....	58
Figura 14 - Bacia do rio Cuiabá e suas sub-bacias. ....	74

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de adjetivos fuzzy. ....	31
Tabela 2 - Exemplo de regras de Inferência para entrada 'x' e saída 'y'. ....	37
Tabela 3 - Comparação dos DSS e ES. ....	44
Tabela 4 - Critérios usados no exemplo. ....	68
Tabela 5 - Valores de importância dos critérios. ....	69
Tabela 6 - Valores de importância dos subconjuntos dos critérios $g(E)$ . ....	69
Tabela 7 - Valores considerados aos escores para o exemplo. ....	70
Tabela 8 – Valores diferentes atribuídos aos escores. ....	71
Tabela 9 - Resultados dos escores de incrementos e decrementos. ....	73
Tabela 10 – Resultados comparativos da IF original e modificada. ....	73
Tabela 11 – Importancia dos critérios usados na avaliação do rio. ....	77
Tabela 12 – Esquema de determinação do grau de importância para o conjunto de critérios..	77
Tabela 13 - Cálculo dos decrementos e incrementos item 1. ....	80
Tabela 14 - Cálculo dos decrementos e incrementos item 2. ....	80
Tabela 15 - Cálculo dos decrementos e incrementos item 3. ....	80
Tabela 16 – Cálculo dos decrementos e incrementos item 4. ....	80
Tabela 17 - Matriz de avaliação dos diferentes valores atribuídos aos escores. ....	81

## RESUMO

O presente trabalho trata da aplicação da Inteligência Artificial (IA), quanto ao apoio de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), utilizando uma modelagem matemática através das integrais fuzzy.

Os métodos tradicionais para avaliação de problemas de decisão multicritério geralmente são tratados por modelos matemáticos que agregam de forma aditiva os fatores submetidos à avaliação, como as medidas de tendência central. Embora muito fáceis de se aplicar, as médias, muitas vezes, não contemplam os critérios de forma conjunta, especialmente quando as grandezas a serem medidas não são independentes e não têm uma métrica objetivamente mensurável, ou seja, quando essas são de caráter subjetivo.

Estimuladas pelo desenvolvimento e pelas possibilidades práticas de aplicação que se apresentam, as metodologias *fuzzy* vêm sendo amplamente aceitas para representar de forma inovadora os modelos de avaliação, quando se propõem a trabalhar com muitos critérios, definindo-se limites de valores e graus de confiança. Ao analisarmos o método da Integral *Fuzzy* proposto em (BORGES, 1996), concluímos que o método é capaz de auxiliar na busca da decisão quando decisores expõem suas preferências em variações de valores que são interpretados e processados pelos modelos.

Diante do contexto, este trabalho vem apresentar a metodologia das integrais, para serem aplicadas em problemas multicritério. É apontado também as diferenças existentes entre as integrais na prática, mostrando um exemplo da aplicação através de uma avaliação de fatores poluentes do rio Cuiabá.

## ABSTRACT

This study is about the application of the Artificial Intelligence (AI) as a support to Decision Support System (DSS). It uses a mathematical models through integrated fuzzy. Mathematical models generally do the traditional methods for evaluation of problems of multicriteria decision that aggregate on additive form the factors submitted to the evaluation, as the measures of central tendency. Although the average rates are quite easy of applying, they sometimes do not take into account the criteria as a conjunct form, especially when the greatness to be measured are not independent and do not have an objectively measurable metric or when they have a subjective character.

Stimulated by the development and for the practical possibilities of application that are presented the methodologies fuzzy has being thoroughly accepted to represent in an innovative way the evaluation models when they intend to work with many criteria being defined limits of values and trust degrees. When the method of the Fuzzy Integral proposed by (BORGES, 1996), was analyzed it was concluded that it is capable to aid in the search of the decision when decision makers expose their preferences in variations of values that are interpreted and processed by the models.

Based on this context, this research presents the methodology of the integral to be applied in multicriteria problems. The differences between the integral in practice showing an example of its application through an evaluation of the pollutant factors of the Cuiabá river is also identified.

# 1. INTRODUÇÃO

A análise multicritério abrange um número bastante significativo de métodos, baseados na construção de modelos matemáticos restritos e na informação levantada dos decisores sobre suas estruturas de preferências (GOMES & GOMES, 2002).

As teorias de decisão multicritério têm sido alvo de inúmeras pesquisas nas últimas décadas a nível mundial e, como consequência, surgiram várias escolas de decisão multicritério, cada uma delas propondo modelos e métodos, baseados em uma estrutura que permita a resolução de problemas com mais de um objetivo, critério ou atributo (GOMES & GOMES, 2002).

A tomada de decisão multicritério procura atingir diversos objetivos simultaneamente, muitos deles conflitantes e não mensuráveis quantitativamente, mas que são possíveis, no entanto, de serem expressos por juízos de valor através de escalas apropriadas. Este assunto é objeto de todo um capítulo, onde encontrasse-a em cunho teórico e mais detalhado, a abrangente área de tomada de decisão, além das bibliografias mencionadas como referência.

Na literatura brasileira, nenhum trabalho que aplicasse o método da Integral *Fuzzy* no processo de decisão multicritério, foi encontrado. O que se têm visto são aplicações utilizando métodos mais comuns e tradicionais de agregação de valores, criados pelas escolas de decisão multicritério.

As Integrais *Fuzzy* possuem um alto potencial para trabalhar com problemas multicritério, quando o especialista tem importante participação. Através da sua estrutura de agregar valores aos critérios, a integral vai adequar os julgamentos propostos pelos decisores, fornecendo uma avaliação sintética das possíveis alternativas.

O exemplo prático, foi aplicado na avaliação da poluição hídrica. A crescente complexidade dos problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, principalmente durante situações de escassez quantitativa ou qualitativa de água, requer a utilização de técnicas e ferramentas capazes de auxiliar os profissionais responsáveis pela operação, planejamento, análise e tomada de decisão.

A técnica da Integral *Fuzzy* é bastante flexível e oferece a possibilidade de tratar parâmetros não mensuráveis, a sua aplicação em recursos hídricos é viável, uma vez que os mesmos apresentam fortes características subjetivas. Simulações matemáticas foram utilizadas para se obter os resultados da aplicação do método original e modificado, conforme é mencionado no capítulo cinco.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral estudar métodos de apoio à tomada de decisão multicritério, apresentando a Integral *Fuzzy* como uma ferramenta importante dentre os métodos conhecidos e que pode ser aplicada nos processos decisórios.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

Tem-se como objetivos específicos:

- estudar a metodologia de apoio à decisão multicritério, Integral *Fuzzy*, na sua forma original;
- estudar e aplicar a metodologia de apoio à decisão multicritério, Integral *Fuzzy*, na sua forma modificada;
- apresentar métodos tradicionais e mais usados no apoio à decisão multicritério;
- examinar as características das metodologias *Fuzzy* apresentadas nas duas formas;
- propor um modelo de aplicação do método multicritério, Integral *Fuzzy*, para calcular a avaliação sintética do grau de poluição do rio Cuiabá.

## **1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho estará disposto da seguinte forma:

No que segue, o capítulo 2 descreve Sistemas de Decisão, abrangendo sua síntese, metodologia, estrutura e funcionalidade. Na sequência, é descrita sua associação aos sistemas computacionais inteligentes.

O Capítulo 3 descreve o uso da Inteligência Artificial na área de apoio à decisão, começando com uma abordagem do assunto, suas origens e conceitos. Mais adiante, cita-se suas formas de unir-se aos tomadores de decisão, através de novas aplicações e possibilidades bem mais amplas no uso de computadores capazes de “raciocínio”.

No Capítulo 4 é feita uma revisão literária sobre a análise multicritério, alguns métodos de agregação são apresentados, incluindo o método da Integral *Fuzzy* nas formas original e modificada, a relação entre essas e um exemplo de aplicação.

No Capítulo 5 apresenta-se o estudo de caso e a aplicação do método multicritério *fuzzy*.

O Capítulo 6 traz algumas sugestões de trabalhos futuros a serem realizados.

Capítulo 7 contempla as conclusões finais.

## **2. SISTEMAS DE SUPORTE A DECISÕES - SSD**

No presente capítulo, far-se-á uma explanação sobre os SSD, conceitos, funcionalidades e sua estrutura.

### **2.1. A TOMADA DE DECISÃO**

Decidir é escolher entre alternativas, para se dar decisão; é o mesmo que emitir uma opinião, sentenciar, resolver, optar. Segundo (GOMES, 1998), a tomada de decisão num ambiente complexo caracteriza-se pela existência de pelo menos alguns dos sete aspectos relacionados a seguir:

- os critérios de resolução do problema são em número de, pelo menos, dois e conflitam entre si;
- tanto os critérios como as alternativas de solução não são claramente definidos e as conseqüências da escolha de uma dada alternativa com relação a, pelo menos, um critério não são claramente compreendidas;
- os critérios e as alternativas podem estar interligados, de tal forma que um dado critério parece refletir-se parcialmente em um outro, ao passo que a eficácia da escolha de uma dada alternativa depende de outra ter sido ou não escolhida, no caso, as alternativas não são mutuamente exclusivas;
- a solução do problema depende de um conjunto de pessoas, cada uma das quais tem seu próprio ponto de vista;
- as restrições do problema não são bem definidas, podendo mesmo haver alguma dúvida a respeito do que é critério e do que é restrição;
- alguns dos critérios são quantificáveis, ao passo que outros só o são através de julgamentos de valor, efetuados sobre uma escala;
- a escala para um dado critério pode ser cardinal, verbal ou ordinal, dependendo dos dados disponíveis e da própria natureza dos critérios.



Várias outras complicações podem surgir num problema real de tomada de decisão, mas esses aspectos caracterizam a complexidade de um tal problema, que, em geral, são problemas considerados mal-estruturados.

Há tempo, o homem vem tentando abordar processos complexos de tomada de decisão através de heurísticas e raciocínios dedutivos. Até a primeira metade deste século, é sabido que se utilizavam basicamente os modelos matemáticos para a tomada de decisão em condições consideradas aleatórias, percebendo, com isso, que, em certas condições, as limitações e o conseqüente risco associado a tal tratamento eram muitas vezes, inaceitáveis.

## **2.2. SSD - UMA VISÃO GERAL**

Os SSD receberam o nome, primeiramente, de sistemas de decisões gerenciais. Na década de 70, empresas e pesquisadores começaram a caracterizá-los como sistemas computacionais interativos, que, por meio de modelos e dados, ajudavam as pessoas a tomar decisões, quando os problemas se tornavam conflitantes e mais complexos. A partir disso, a maioria dos sistemas que apoiavam uma decisão era considerado como sistemas de apoio à decisão.

De acordo com (PORTO et al., 1997) o termo Sistema de Suporte a Decisões tem sido objeto de discussões e recebido diferentes interpretações nos últimos 20 anos. Na tentativa de caracterizar os sistemas de apoio à decisão, algumas características devem ser examinadas:

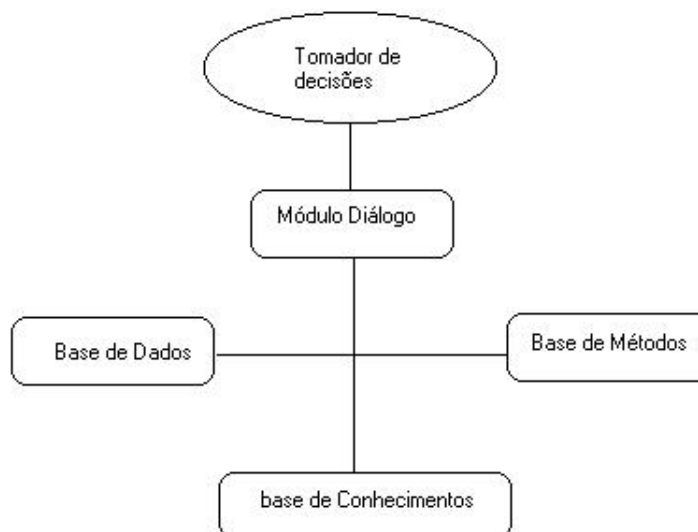
- SSD são voltados para a resolução de problemas menos estruturados e menos especificados, isto é, problemas que não servem apenas para uma situação, mas que englobam as outras que poderão ser afetadas por estas;
- combinam uso de modelos com funções de recuperação de informação; têm, como principal meta, uma flexibilização que apoia tanto as pessoas menos qualificadas quanto as mais instruídas;
- caso ocorra alguma mudança no ambiente, esta deve acontecer da forma que mais se adapte ao usuário final.

Os SSD também podem ser informatizados, quando a obtenção dos dados com melhor qualidade e maior velocidade poderão auxiliar e muito na tomada de decisões, pois podem sugerir novos caminhos decisórios para serem adotados com maior precisão e com uma interface amigável para o usuário final.

### 2.2.1. O que é o Suporte à Decisão?

Em (PORTO et al., 1997) ressalta que os SSD são sistemas que modelam o conhecimento de um ou mais especialistas, o qual, geralmente, não está disponível na literatura. Esse tipo de sistema possui um alto potencial para resolver problemas, nos quais a experiência tem uma importante função, uma vez que soluções algorítmicas não existem ou não são adequadas.

Em um SSD, o computador auxilia o homem na utilização de informações e modelos, obedecendo aos três principais componentes de sua arquitetura: a base de dados, a base de modelos e a interface de diálogo, ilustrados na Figura 1, a seguir.



**Figura 1 - Estrutura típica de um SSD.**

*Fonte: PORTO, 1997.*

A Base de Dados deve ser capaz de reunir todas as informações importantes sobre o problema abordado e gerenciá-las de forma apropriada. Composto as funções de

gerenciamento, estão a importação e a exportação de dados, a agregação e a desagregação, a recuperação, a emissão de relatórios e outros. É o componente central para os SSD, pois é onde está reunido o “conhecimento” que se tem do problema.

A Base de Métodos, por sua vez, deve conter os instrumentos conceituais (modelos) necessários à análise e formulação de alternativas de solução do problema em questão. Deve solicitar e receber dados de que necessita, conferir-lhes significado adequado para realimentar a base de dados. Aqui também devem existir funções do tipo de gerenciamento dos dados e dos modelos.

A Base de Conhecimentos incorpora ao sistema informações que, geralmente, não são passíveis de tratamento pelos módulos anteriores, mas, indispensáveis para o tomador de decisões; esses conhecimentos se referem à experiência, aos conhecimentos empíricos, às leis e costumam ser constituídos por regras de inferência do tipo “Se então”, que representam parte importante do sistema.

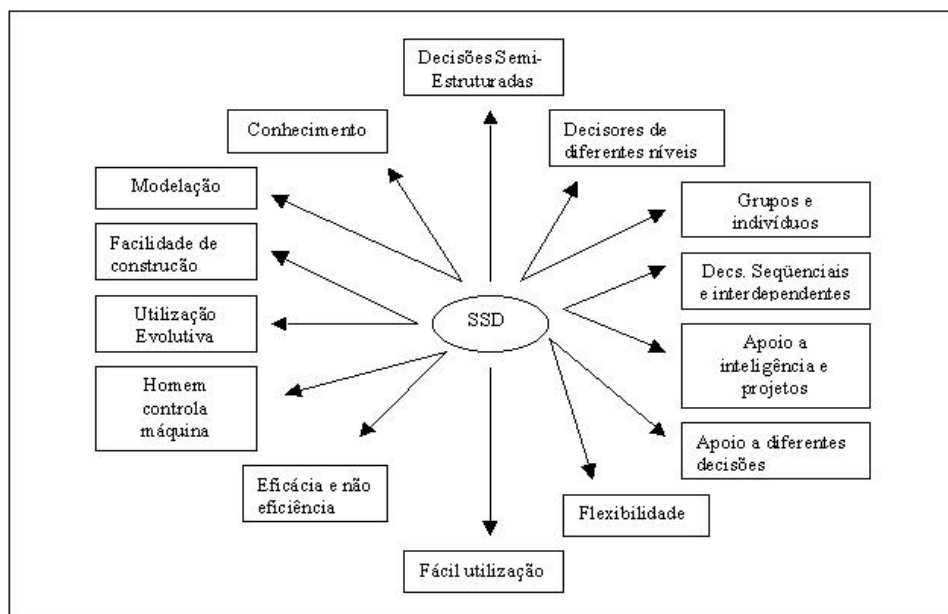
O Módulo de Diálogo é responsável pela comunicação do usuário com o computador. Deve ser capaz de receber instruções, consultas e informações do usuário e transmitir as respostas a estes da forma mais apropriada possível. O tratamento dessa interação homem-máquina se dá através de menus, planilhas, gráficos, até mesmo de voz, sons e imagens, realidade virtual, em decorrência dos avanços tecnológicos.

Como não existe consenso a respeito da definição do SSD, alguns autores preferem apontar as características necessárias ou desejáveis destes sistemas (PARKER & AL-UTABI, 1986 apud PORTO et al., 1997) após a revisão de 350 publicações sobre o tema, advogam que este deve:

- assessorar administradores no processo de tomada de decisões a respeito de problemas não estruturados ou semi-estruturados;
- apoiar e aprimorar o julgamento humano e não tentar substituí-lo;
- melhorar a eficácia da decisão do que sua eficiência, ou em outros termos, dar mais importância à qualidade da decisão do que ao tempo necessário para encontrá-la;

- enfatizar as características de flexibilidade e adaptabilidade no que diz respeito à mudança de contexto do processo decisório;
- combinar o uso de modelos (técnicas analíticas) com funções de acesso a dados;
- enfatizar a facilidade de uso, inclusive por usuários inexperientes ou não especializados;
- facilitar a interação entre o usuário e o sistema, permitir a busca de soluções por processos tentativos;
- permitir a incorporação de julgamentos subjetivos;
- incorporar o conhecimento de especialistas;
- incorporar, quando necessário, variáveis de cunho social, político e psicológico.

Esta relação está longe de ser exaustiva. Figura 2, (TURBAN, 1993 apud PORTO et al., 1997) relaciona os atributos que adotou a respeito dos SSD, ressaltando que a presença de todos eles não é obrigatória.



**Figura 2 - Característica de um SSD, segundo TURBAN.**

*Fonte: PORTO, 1997.*

Não existe até o momento metodologia generalizada para construção destes sistemas que garantam *a priori* boas soluções. Fatores subjetivos podem entrar em cena com pesos significativos e precisam ser considerados com o devido cuidado, ao lado de outros aspectos que podem ser tratados mais objetivamente.

Construir um SSD tem a ver com a combinação criativa de técnicas já existentes para produzir informações, a partir das quais indivíduos tomarão decisão; devem ser centradas no problema da decisão e não obrigatoriamente na utilização das técnicas melhores ou mais avançadas. Em outras palavras, o melhor SSD não é aquele que utiliza as melhores técnicas, mas, sim, aquele que é capaz de induzir às melhores decisões.

### **2.3. DECISÃO E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS**

Tomar uma decisão é o mesmo que analisar alternativas e escolher uma delas; solucionar problemas tem a ver com o procedimento do indivíduo, que, diante de uma situação desfavorável, precisa atuar no sentido de torná-la mais satisfatória, mediante a realização de certos objetivos.

Segundo (PORTO et al., 1997) o homem soluciona problemas a partir de dois elementos essenciais: a *informação*, que permite conhecer uma determinada situação que requer sua atuação, e a *concepção intelectual* do problema, ou seja, suas variáveis e como elas se interagem.

Uma das abordagens científicas adotadas para o estudo dos problemas decisórios é a abordagem normativa, que procura atingir uma decisão “ótima”, ou seja, prescreve como as decisões devem ser tomadas, e uma outra a comportamental, que se preocupa em entender como as pessoas agem diante de problemas decisórios.

Na abordagem normativa, o modelo admite que o tomador de decisões aja sempre racionalmente, no sentido de maximizar a utilidade de sua escolha; em outras palavras, ele é capaz de calcular as conseqüências de cada uma das alternativas, relacioná-las em ordem de preferência e, finalmente, escolher aquela que maximiza a sua utilidade.

Essa teoria procura formalizar e tornar mais objetiva a solução do problema da escolha de uma entre muitas alternativas em um ambiente de incerteza, não diz ter a fórmula

para a tomada das melhores decisões, pois apóia-se, em grande parte, no conceito de valor ou preferência do tomador de decisão.

### **2.3.1. Fatores Humanos**

Decidir é um ato humano e, portanto, fica suscetível às preferências, fraquezas, aos erros e a outros fatores inerentes a esta condição. Precisa ficar claro que SSD não é construído para tomar decisões para o homem e, sim, para apoiá-lo ou assisti-lo na execução desta tarefa.

Tomar decisão é objeto de discussão em diversos campos da psicologia (social, comportamental, cognitiva etc), onde são apresentados teorias e modelos que ajudam a entender melhor o comportamento do tomador de decisões diante de problemas decisórios. Abordaremos abaixo alguns aspectos das distorções ou desvios que administradores costumam apresentar diante de problemas decisórios.

Disponibilidade – Utilizar apenas as informações disponíveis, ignorando aquelas que não são fáceis de se obter, embora sejam significativas.

Desvios de confirmação – Usualmente, as pessoas tendem a utilizar informações que confirmam crenças consagradas e a desprezar (ou conferir menor peso) àquelas que distorcem estas crenças.

Conservadorismo – Tendência de não rever estimativas e procedimentos com a frequência necessária.

Hábito – A familiaridade ou experiência com certas regras ou metodologias, utilizadas em situações semelhantes, não considerando devidamente as características de cada caso.

Saturação de dados – Às vezes, tomam-se decisões de encerrar a coleta de dados prematuramente, ignorando as informações que chegam mais tarde.

Confiança exagerada – As pessoas tendem a ter muita confiança quando dispõem da abundância de informações e dedicar pouca atenção à qualidade e à consistência destes dados.

Pistas empíricas – Frequentemente, a efetiva realização de eventos com pequena probabilidade de ocorrência ou por mero acaso é aceita pelas pessoas com um peso muito maior do que realmente tem.

Ilusão de correlação – Admite-se erradamente que dois eventos são correlacionados quando, na verdade, a correlação é espúria ou pouco significativa.

Os desvios relacionados não são independentes entre si, ao contrário, é provável que um tipo de distorção de julgamento seja a causa de outro. A questão prática que deve ser enfatizada agora é a seguinte: de que maneira este conjunto de conhecimentos pode ajudar a melhorar a qualidade das decisões? Como devemos construir os sistemas, de forma a evitar ou minimizar ocorrências de falhas de julgamento?

### **2.3.2. Processo para a Tomada de Decisões**

Um dos conceitos centrais para o projeto de um SSD é a descrição do processo da tomada de decisões. Em (SIMON, 1997 apud MENTZAS<sup>2</sup>, 2002) tomar decisões é um processo de três fases: inteligência, projeto e escolha.

Na fase “inteligência”, procura-se entender o problema, identificar as variáveis significativas, coletar dados, formular objetivos e propor alguma solução. Na fase “projeto”, busca-se formular os modelos que representem adequadamente o problema em questão, estabelecer critérios de escolha e gerar alternativas de solução. Durante a fase “escolha”, seleciona-se a melhor alternativa à análise de sensibilidade e, eventualmente, traçam-se os planos para implementação da linha de ação escolhida.

Porém, a capacidade humana de pensar, intuir e de agregar conhecimentos e experiências vividas, faz com que o modelo de Simon não seja obedecido exatamente nessa mesma ordem. Não é comum as pessoas se concentrarem, por exemplo, só na fase de inteligência, sem antecipar o seu modelo de solução para o problema. Também é possível retornar a uma fase anterior do processo, quando se adquire informações que fazem necessário repensar e analisar outros cursos de ação.

Outras propostas seguiram o mesmo raciocínio de Simon, procurando explicar melhor o processo decisório humano; algumas são, de forma geral, mais ricas e mais complexas, mas sempre obedecendo à mesma estrutura.

### **2.3.3. Critérios para Tomada de Decisão**

Quando temos diferentes fatores que contribuem para a nossa decisão, como fazer para determinar a contribuição relativa de cada um?

Antes de adotar um determinado tipo de critério, o tomador de decisões precisa definir quais são os princípios que orientarão sua escolha. Entende-se como princípio de escolha o conjunto de diretrizes gerais que definirão a metodologia de solução.

Nesta fase, o usuário vai buscar respostas a perguntas do tipo: qual solução procura-se, “ótima” ou “satisfatória”? A solução é conservativa ou existe disposição de assumir riscos significativos? Procura expressar as alternativas em termos monetários ou em termos de outro indicador de desempenho?

Depois de uma revisão literária, observa-se que há uma série de critérios adotados para avaliação de um determinado propósito, critérios que refletem valores éticos e morais, sociais e políticos, técnicos e econômicos. Observa-se, ainda, que alguns deles se alteram com o passar do tempo, devido à mudança de valores do ponto de vista do ser humano; isso mostra que ainda não se encontraram critérios universalmente aceitos para se tomar decisões.

### **2.3.4. Sistema de Suporte à Decisão em Grupo - SSDG**

Tem-se discutido muito que as atividades de tomada de decisão em grupo são economicamente necessárias e eficientes como meios de produção, além de reforçar valores democráticos. Os SSDG são sistemas interativos baseados em computador, que facilitam a solução de problemas não estruturados, através de um conjunto de tomadores de decisão trabalhando em grupo.

Os SSDG estão se desenvolvendo com a aplicação da moderna tecnologia da informação, com o uso de redes do tipo LAN, de e-mail e de softwares de apoio à decisão. Os



Sistemas Especialistas estão sendo usados como ferramenta de trabalho e de gerenciamento de atividades. A comunicação está se tornando mais impessoal, menos emotiva, mais focalizada, apropriada a negócios, despersonalizada e orientada a atividades e a objetivos das organizações (GOMES, 1998).

Por esses motivos, dois novos conceitos emergem como extremamente atuais nos ambientes de negócios: eficiência média (medida de informações processadas por unidade de tempo, enviadas pelo transmissor e recebidas pelo receptor em atividades como agendas, troca de opiniões e informações, geração de idéias ou solução de problemas) e “media richness” (medida de conteúdo social e emotivo da comunicação, associada à barganha, persuasão e ao desagrado; mistura de extensão e *feedback*, multiplicidade de tons, sonoridade, facilidade de diálogo e variedade de línguas, enfoques pessoais), tudo com o objetivo da convergência da interpretação e da diminuição do equívoco (GOMES, 1998).

Os sistemas de suporte à decisão têm-se mostrado como ferramentas poderosas para auxiliar os SSDG, porém, muitas vezes, os grupos costumam dificultar e até impossibilitar a escolha de um bom resultado, devido às naturais diferenças de ponto de vista, interesses, ideologias e formação dos participantes (PORTO et al., 1997).

## **2.4. ESTRATÉGIAS PARA O PROJETO DE UM SSD**

Não existe receita para construção destes sistemas; no entanto, é possível traçar algumas diretrizes que a experiência tem mostrado serem úteis para a obtenção de bons sistemas. O primeiro passo é considerar que eles devem ser instrumentos essencialmente práticos, sendo dirigidos para os objetivos formulados de maneira simples, direta e clara; esses atributos devem ser observados ao longo do processo do projeto.

É importante ressaltar que os sistemas de decisão eficazes não dependem somente de seus atributos técnicos, como a qualidade de seus dados ou a excelência de seus modelos. Existem outros fatores importantes que precisam ser considerados: fatores administrativos, político-sociais e psicológicos, além de ressaltar o tipo de nível das decisões, a cultura da organização responsável pelas decisões, o ambiente em que o processo decisório se desenvolve e a figura do decisor.

### **2.4.1. Papéis e Atores**

Os sistemas de decisão mais complexos tendem a envolver diversas áreas do conhecimento, grandes bases de dados e modelos matemáticos avançados, o que, provavelmente, exigirá uma equipe especializada para tratá-los; caso contrário, é possível uma única pessoa para operá-lo. Nos dois casos, identifica-se os atores e seus papéis. O decisor ou tomador de decisões, que, comumente, referido no singular, nem sempre é um único indivíduo, é o consultor do sistema e o receptor das informações que serão utilizadas para responder ou melhorar a qualidade das decisões.

O executor é responsável pelo projeto, pela implantação e eventualmente, pela manutenção do sistema. Esse ator poderá pertencer à equipe ou ser contratada externamente para executar tal ação. Independente de qualquer situação, o executor deve se preocupar com quatro aspectos fundamentais:

- a) o que o decisor deseja?
- b) de que o decisor precisa?
- c) o que o decisor pode ter?
- d) o que o executor pode oferecer?

### **2.4.2. Arquitetura de Sistemas de Suporte à Decisão**

Abordaremos novas arquiteturas propostas por outros autores, com diferentes propósitos, vantagens e desvantagens na estruturação destes sistemas.

#### **a) Abordagem Funcional**

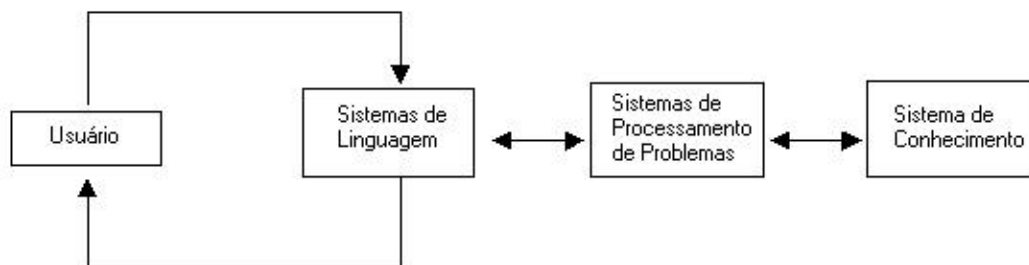
A abordagem funcional proposta em (BONEZEK, 1981 apud PORTO et al., 1997) concentra-se nas funções que um sistema de decisão deve executar. São apontados três

componentes principais, que diferem por suas funções e não pela ferramenta utilizada na sua construção.

- a. O sistema de linguagem;
- b. O sistema de processamento de problemas;
- c. O sistema de conhecimento.

A abordagem funcional não se preocupa em descrever qual ferramenta se utilizou na construção dos componentes do sistema. A vantagem desta proposta é a facilidade em abrigar sistemas especialistas. O módulo “sistema de conhecimento” tem a capacidade de armazenar conhecimentos em forma de regras de decisão, enquanto que o “sistema de processamento de problemas” prevê a existência de mecanismos de inferência para tratar tais regras.

O problema é formulado pelo usuário, a partir do módulo “sistema de linguagem” que aciona o “sistema de processamento de problemas”, que, por sua vez, procura as informações necessárias no “sistema de conhecimento”. Veja o esquema na Figura 3.



**Figura 3 - Arquitetura funcional de um SSD.**

*Fonte: PORTO, 1997.*

O “sistema de linguagem” se caracteriza pelas diferentes possibilidades de formular o problema oferecido ao usuário, emitir comandos, apresentar os resultados. O “sistema de processamento de problemas” é a peça fundamental deste tipo de arquitetura, pois lhe cabe receber as informações do usuário, analisar a sua consistência e verificar se o modelo proposto serve para executar as informações, além de interagir com o “sistema de conhecimento”.

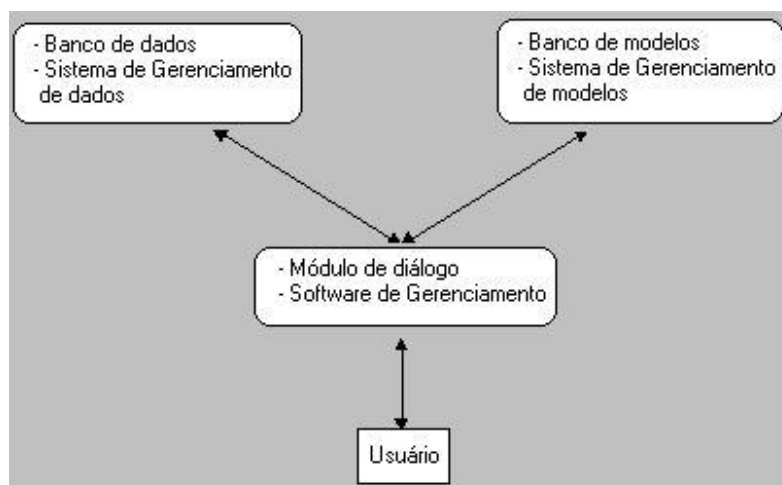
A função do “sistema de conhecimento” é a de armazenar o conjunto de informações que expressam o que se conhece do problema. Pode ser armazenado através de um banco de dados, conjunto de regras, imagens, gravações sonoras, dentre outros.

### **b) Abordagem instrumental**

A abordagem instrumental proposta em (SPRAGUE & CARLSON, 1982 apud PORTO et al., 1997) representada na Figura 4, é uma das mais utilizadas para representar a estrutura conceitual de um “sistema de suporte à decisão”, um pouco mais rígida e menos geral, o que facilita a identificação de vários componentes do sistema, sua execução e manutenção. A abordagem instrumental apresenta:

- a. A base de dados / sistema gerenciamento de dados;
- b. O banco de modelos / sistema de gerenciamento de modelos;
- c. O módulo de diálogo / software de gerenciamento.

A “base de dados” e o “sistema de gerenciamento” são capazes de extrair as informações de fontes externas e incluí-las no banco de dados do modelo, armazenando o conhecimento e integrar-se com o restante do sistema. A base de modelos executará diversos níveis de decisão, facilitará alterações nos modelos existentes, juntamente com a facilidade na manutenção dos módulos e se comunicará com o módulo de diálogo, que promove a interface homem e máquina.



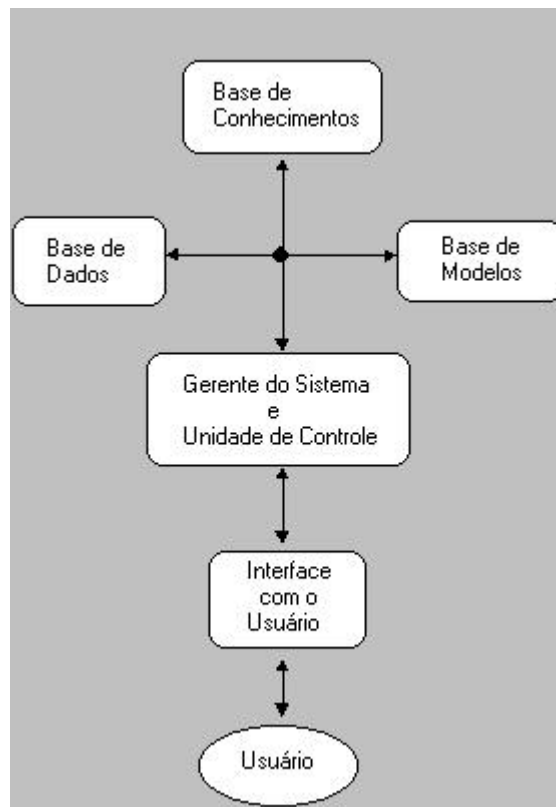
**Figura 4 - Arquitetura instrumental de um SSD.**

Fonte: PORTO, 1997.

### c) Arquitetura Expandida

O modelo expandido encontrado em (GUARISO & WERTHNER, 1989 apud PORTO et al., 1997) Figura 5, abriga todas as possibilidades e funções de um sistema de decisão, ajudando os executores destes sistemas. Na proposta destes autores, o módulo de interface mantém o mesmo padrão das demais arquiteturas vistas, e os demais módulos sofrerão algumas modificações. Usualmente, a arquitetura expandida deve apresentar:

- a. A base de dados;
- b. Base de modelos;
- c. Base de conhecimentos;
- d. Gerenciamento do sistema / unidade de controle;
- e. Interface com o usuário.



**Figura 5 - Arquitetura expandida de Guariso e Whertner.**

*Fonte: PORTO, 1997.*

A “base de conhecimento” adicionada em módulo separado abriga informações em forma de declarações, regras, procedimentos, enquanto que a base de modelos contém os modelos procedurais; por fim, a parte de gerenciamento que, nas arquiteturas anteriores ficavam, de certa forma, difusas em diversos módulos, aqui estão concentradas em uma única unidade de controle e gerenciamento do sistema.

A vantagem da abordagem expandida sobre as demais se deve ao fato de os seus módulos serem distintos, enfatizando suas funções, deixando mais claro e menos ambíguo o conteúdo de cada um deles, facilitando o projeto, a execução e as posteriores manutenções.

### **3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO APOIO AOS SSD**

Neste capítulo, introduz-se alguns conceitos sobre a Inteligência Artificial, os sistemas de decisão e sua implementação aos programas inteligentes.

#### **3.1. VISÃO SOBRE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Não se sabe, com exatidão, quando surgiu a Inteligência Artificial. Sua origem se deu por volta de 1950, com o precursor, Alan Turing, que se preocupava com questões abstratas sobre a inteligência da máquina. Turing, concluiu que os programas de computador poderiam ser armazenados da mesma forma que os dados na memória, e caso houvesse necessidade, seriam executados. Porém, só em 1956 é que a Inteligência Artificial começa a ser reconhecida como ciência (BARRETO, 1999).

Alguns autores preferem conceituar a IA como:

“A habilidade das máquinas fazerem coisas que as pessoas diriam requerer inteligência” (JACKSON, 1949);

“A capacidade dos computadores ou programas de computadores operar imitando os humanos através do processo de raciocínio e aprendizagem” (MUNAKATA, 1998);

“A tecnologia de processamento de informação que envolve processos de raciocínio, aprendizado e percepção” (WINSTON, 1992);

“O estudo das faculdades mentais com o uso de modelos computacionais” (BARRETO, 1999).

Na Inteligência Artificial, estudam-se técnicas que tornam os computadores capazes de tomar decisões, de forma parecida com o humano. Os sistemas de apoio à decisão, em grande parte utilizam técnicas de análise de sistemas e pesquisa operacional, para produzir cenários que apoiem a tomada de decisão. A IA oferece uma diversidade de modelos lógicos matemáticos, que, bem definidos, podem expressar decisões bem sucedidas.

Por muitos anos, as pesquisas em IA foram orientadas para abordagens de problemas em ambientes estáticos. Contudo, estas pesquisas mostraram-se inadequadas para diversos problemas do mundo real onde há necessidade de se prever e modelar situações com ambientes dinâmicos e reais, cheios de imprecisões e incertezas, para melhor compreensão dos processos mentais e do conhecimento.

Já é possível dotar máquinas de capacidade de raciocínio e aprendizado com o estudo na área da IA, que hoje é bastante amplo. Qualquer aplicação, neste sentido, depende fundamentalmente da forma de aquisição, retenção e manipulação do conhecimento. Dentre suas áreas de pesquisa, destaca-se o processamento da linguagem natural, o reconhecimento de padrões, a robótica, os jogos educacionais, os sistemas especialistas e os sistemas de apoio à decisão.

### **3.2. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL UNIDA AOS SSD**

Etimologicamente, a palavra inteligência vem do latim *inter* (entre) e *legere* (escolher); portanto, é correto dizer que inteligência significa aquilo que nos permite escolher entre uma coisa e outra.

A palavra artificial vem do latim *artificiale*, e significa algo não natural, isto é, produzido pelo homem. Concluindo, Inteligência Artificial é um tipo de inteligência produzida pelo homem, para dotar as máquinas de algum tipo de habilidade que simule a inteligência humana.

As pesquisas da IA são, muitas vezes, definidas como uma procura por modelos computacionais gerais da inteligência humana. Hoje, os administradores contam com várias bases de conhecimento embutidas nos sistemas especialistas, que trabalham junto com SSD; o usuário contará com sua experiência e com a de outros especialistas, cujos conhecimentos estarão armazenados nos computadores de acordo com as técnicas de IA.

A necessidade de se integrar efetivamente ferramentas de tomada de decisão com técnicas de inferência e raciocínio tem provocado grandes esforços na busca de se integrar sistemas de suporte à decisão com sistemas especialistas. Os sistemas resultantes dessa união têm recebido várias denominações, vejamos: Sistema de Suporte à Decisão Inteligente



(SSDI), Sistema de Suporte Gerenciado por Base de Conhecimentos (SSGC), Sistema de Suporte à Decisão Especialista (SSDE) , ou ainda, Sistema de Suporte Especialista (SSE) (MENTZAS<sup>1</sup>, 2002).

Atualmente, existem muitos sistemas que implementam métodos de sistemas especialistas, baseados em modelos matemáticos e em banco de regras, que reproduzem o conhecimento de um determinado problema; assim, outras tecnologias também são empregadas para encontrar tendência ou padrões, a fim de apoiar as decisões.

Pode-se dizer que associar técnicas inteligentes com a tarefa de tomar decisões impulsionou a construção de SSD. Os sistemas especialistas estão entre as primeiras aplicações das técnicas de Inteligência Artificial. Funcionam com regras extraídas do conhecimento humano, cuja capacidade de inferência e raciocínio pretendem imitar.

Para manipulação e avaliação dessas regras, os sistemas utilizam a Teoria Bayesiana de Decisão (TBC) ou a Teoria dos Conjuntos Difusos (TCD), dentre outros, capazes de evidenciar e simular o comportamento humano.

### **3.3. TECNOLOGIAS E SISTEMAS**

Em termos de tecnologia de implementação, as ferramentas utilizadas na construção dos sistemas de decisão se apresentam em grande escala na IA, que fornece métodos e técnicas para o desenvolvimento de programas que simulam, nas máquinas, comportamentos inteligentes, tornando-as capazes de tomar decisões. A Inteligência Artificial busca, através das técnicas conexionistas, evolucionárias e cognitivas, o desenvolvimento de sistemas inteligentes que imitem aspectos do comportamento humano.

#### **3.3.1. Abordagem Conexionista**

A abordagem conexionista é também denominada de biológica ou ascendente. A Inteligência Artificial conexionista enfoca o modelo de funcionamento do cérebro, dos neurônios e das conexões neurais. A representação e a formalização matemática dos neurônios artificiais fizeram surgir os primeiros modelos de redes neurais artificiais.

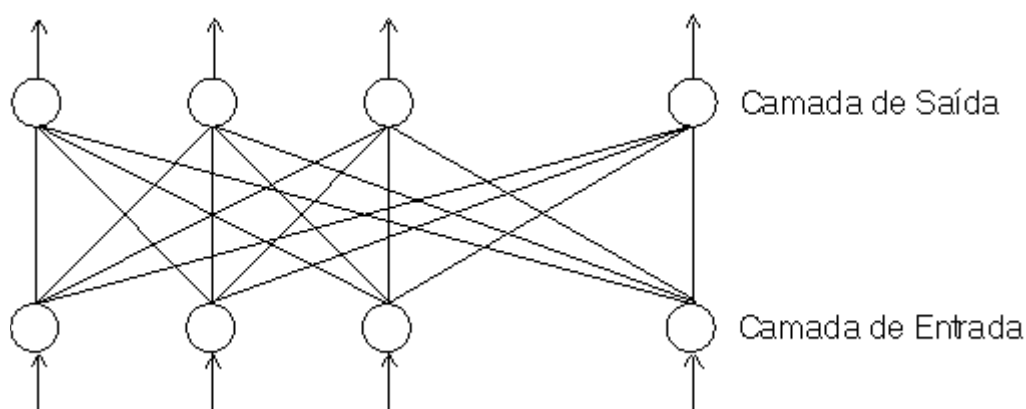
## - Redes Neurais Artificiais - RNA

Informalmente, uma Rede Neural Artificial é um sistema composto por vários neurônios, de modo que as propriedades de sistemas complexos sejam usadas. Estes neurônios estão ligados por conexões, chamadas conexões sinápticas (BARRETO, 1997).

O processamento em redes neurais ocorre, em sua maioria, de modo paralelo, diferentemente da computação convencional, que apresenta processamento seqüencial. Uma RNA é composta por vários elementos de processamento. Esses elementos geralmente são conectados por canais de comunicação, que estão associados a determinados pesos.

Os pesos são coeficientes adaptativos da rede, que determinam a intensidade dos sinais de entrada, ou seja, são medidas de força de conexão. Os elementos fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são as entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento inteligente de uma RNA vem das interações entre os elementos de processamento da rede.

Na Figura 6, tem-se um exemplo de uma rede neural disposta em duas camadas: A camada de entrada, recebe os sinais padrões apresentados à rede; e a camada de saída, recebe o resultado final.



**Figura 6 - Estrutura de uma rede neural disposta em duas camadas.**

Fonte: <<http://www.din.uem.br/ia/neurais/#neural>>

As redes neurais são também classificadas de acordo com a arquitetura em que foram implementadas, topologia, características de seus nós, regras de treinamento e tipos de modelos; possuem uma forma de regra de aprendizagem, que é responsável pela modificação

dos pesos sinápticos a cada ciclo de iteração, de acordo com os exemplos que lhes são apresentados. Assim, pode-se dizer que as RNA aprendem por exemplos.

Em (RUMELHART & McCLELLAND, 1986 apud GALVÃO et al., 1999) os modelos de redes neurais, de maneira geral, apresentam oito componentes principais:

- um conjunto de elementos de processamento;
- um estado de ativação;
- uma função de saída para cada elemento de processamento;
- um padrão de interconexão entre os elementos de processamento;
- uma regra de propagação;
- uma regra de ativação;
- uma regra de aprendizado;
- uma representação do ambiente onde o sistema deve operar.

A propriedade mais importante das redes neurais é a habilidade de aprender de seu ambiente e, com isso, melhorar seu desempenho. Isso é feito através de um processo iterativo de ajustes aplicado a seus pesos, o treinamento. O aprendizado ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas.

A rede neural se baseia nos dados para extrair um modelo geral. Portanto, a fase de aprendizado deve ser rigorosa e verdadeira, a fim de se evitar modelos espúrios. Todo o conhecimento de uma rede neural fica armazenado nas sinapses.

Cinquenta a noventa por cento do total de dados devem ser separados para o treinamento da rede, dados estes escolhidos aleatoriamente, para que a rede "aprenda" as regras e não "decore" exemplos. O restante dos dados só é apresentado à rede neural na fase de testes, para que ela possa "deduzir" corretamente o inter-relacionamento entre os dados.

As aplicações de redes neurais são inúmeras. Vejamos algumas:

- análise e processamento de sinais;
- controle de processos;
- robótica;
- classificação de dados;
- reconhecimento de padrões em linhas de montagem ;
- filtros contra ruídos eletrônicos;
- análise de imagens;
- análise de voz;
- avaliação de crédito;
- análise de aroma e odor.

### **3.3.2. Abordagem Evolutiva**

Os mecanismos tratados na evolução biológica, como a seleção natural de indivíduos de uma população, mutações, dentre outros, são também empregados na Inteligência Artificial Evolutiva. Considera-se que o conhecimento adquirido passa de geração a geração pela informação que os genes transmitem.

#### **- Algoritmos Genéticos - AG**

Algoritmos Genéticos são considerados algoritmos de busca, que implementam os mecanismos da evolução natural. Um AG é um simples modelo computacional da seleção natural e da evolução, ou seja, é baseado na simulação da dinâmica de populações (RUSS et al., 1996).

Os AG são métodos de otimização e busca, inspirados nos mecanismos de evolução da população de seres vivos (HOLLAND, 1975 apud GALVÃO et al., 1999). Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e da sobrevivência do mais apto.

A técnica de AG fornece um mecanismo de busca adaptativa, que se baseia no princípio Darwiniano de reprodução e sobrevivência dos mais aptos. Isto é obtido a partir de uma população de indivíduos (soluções), representados por cromossomas (palavras binárias), cada um associado a uma aptidão (avaliação do problema), que são submetidos a um processo de evolução (seleção e reprodução) por vários ciclos.

Os AGs são muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais.

Além de ser uma estratégia de gerar e testar, por serem baseados na evolução biológica, são capazes de identificar e explorar fatores ambientais e convergir para soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em níveis globais.

Antes de prosseguir com a análise das características destes algoritmos, alguns conceitos básicos são necessários; estes conceitos podem ser naturalmente expostos, explicando o funcionamento básico destes algoritmos.

Inicialmente, é gerada uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos, que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: para cada indivíduo é dada uma nota ou índice, refletindo sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados são mantidos, enquanto os outros são descartados (método darwinismo).

Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais através de mutações e cruzamento (crossover) ou recombinação genética, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Os AGs são algoritmos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética. Eles empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada, mas aleatória, que é voltada em direção ao reforço da busca de pontos de "alta aptidão", ou seja,

pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) tem valores relativamente baixos (ou altos).

Otimização é a busca da melhor solução para um dado problema; consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida neste processo, de forma a encontrar soluções cada vez melhores.

Apesar de aleatórios, eles não são caminhadas aleatórias não direcionadas, pois exploram informações históricas, para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Isto é feito através de processos iterativos, onde cada iteração é chamada de geração (GALVÃO et al., 1999).

Durante cada iteração, os princípios de seleção e reprodução são aplicados a uma população de candidatos que pode variar, dependendo da complexidade do problema e dos recursos computacionais disponíveis. Através da seleção, se determina quais indivíduos conseguirão reproduzir-se, gerando um número determinado de descendentes para a próxima geração, com uma probabilidade determinada pelo seu índice de aptidão.

O princípio básico do funcionamento dos AGs é que um critério de seleção vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. A maioria dos métodos de seleção é projetada para escolher, preferencialmente, indivíduos com maiores notas de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população. Um método de seleção muito utilizado é o Método da Roleta, onde indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta (GALVÃO et al., 1999).

É importante ressaltar que alguns parâmetros influenciam no comportamento dos AG, para que se possa estabelecê-los conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis. Vejamos:

- Tamanho da População: O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AG;
- Taxa de Cruzamento: Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população;

- Taxa de Mutação: Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada posição fique estagnada em um valor, além de possibilitar que se chegue em qualquer ponto do espaço de busca;
- Intervalo de Geração: Controla a porcentagem da população que será substituída durante a próxima geração.

As aplicações na área geralmente exigem soluções adaptativas. Sistemas adaptativos tentam resolver problemas, acumulando conhecimento sobre o problema e utilizando estas informações para gerar soluções aceitáveis. Estes problemas, tipicamente, se encontram nas áreas de configuração de sistemas complexos, alocação de tarefas, seleção de rotas, entre outros de otimização, apresentados a seguir:

- controle de sistemas dinâmicos;
- indução e otimização de bases de regras;
- encontrar novas topologias conexionistas;
- simulação de modelos biológicos;
- evolução interativa de imagens;
- composição musical.

### **3.3.3. Abordagem Cognitiva**

Também denominada de Descendente ou Simbolista, a Inteligência Artificial Simbólica dá ênfase aos processos cognitivos, ou seja, à forma como o ser humano raciocina. Objetiva encontrar uma explicação para comportamentos inteligentes baseada em aspectos psicológicos e em processos algorítmicos.

Um dos aspectos fundamentais da simulação cognitiva é evidenciar a dinâmica que religa as diferentes etapas da tomada de decisão em controle de processos. Em relação ao modo de simulação por sistemas especialistas, pode-se dizer que a simulação cognitiva

introduz apenas novas condicionantes (são as regras que conduzem a evolução dos parâmetros) sobre o funcionamento do sistema homem-máquina (VERGARA, 1995).

Estas condicionantes são essencialmente de natureza psicológica, que caracterizam em particular: os mecanismos de controle da atenção; o fato de que o operador tem capacidade de tratamento da informação limitada; as estratégias heurísticas de diagnóstico; as estratégias de planificação; os mecanismos de antecipação de estados futuros; as regras de comunicação e de troca de informação entre operadores, dentre outros (VERGARA, 1995).

### **- Lógica Fuzzy**

Se a lógica *fuzzy* tem uma origem, esta reside na tentativa da lógica do polonês Jan Lukasiewicz quando desenvolveu uma lógica "multivalente" nos anos de 1920, refinando a lógica binária do sim-não, para permitir estados indeterminados. Em 1965, o matemático Lotfi Zadeh, de Berkeley, aplicou essa nova lógica à teoria dos conjuntos, em seu artigo "Conjuntos Difusos", que depois emprestou veio a emprestar seu nome à lógica (RUSS et al., 1996).

E embora nos Estados Unidos a lógica difusa seja mais ridicularizada que festejada, ela virou uma verdadeira mania na indústria japonesa. "Máquinas inteligentes" desenvolvidas no Japão são aparelhos programados para lidar com estados intermediários entre "Liga" e "Desliga", com quantidades que se pode graduar de forma mais sutil que o simples "alto", "médio" ou "baixo", com respostas que não são apenas "sim" ou "não", mas também um meio-termo. As máquinas difusas usam conjuntos difusos para produzir respostas mais flexíveis.

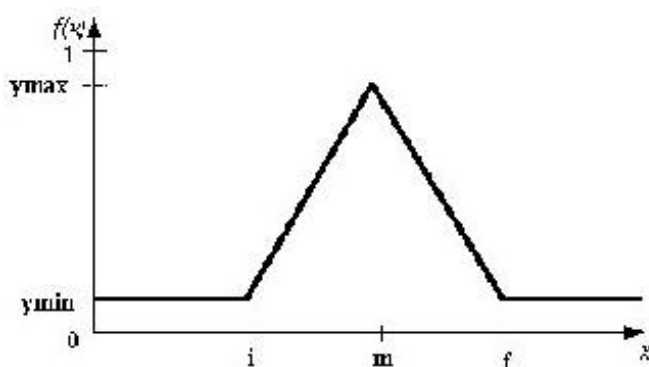
No conceito dos conjuntos booleanos, ou uma coisa pertence a um conjunto ou não pertence. O número 2 pertence ao conjunto de números pares e não ao conjunto de números ímpares, e os dois conjuntos têm uma "intersecção vazia", ou seja, nenhum número é, ao mesmo tempo, par e ímpar. Por convenção, o número 0 não é nem par nem ímpar. Os conjuntos de Zadeh, entretanto, são, indefinidos, são como dizer, difusos. Algumas coisas pertencem a estes conjuntos e outras não mas existe uma terceira classe de coisas que pertence até certo ponto.

Para explicar o conjunto de Zadeh, temos que tratar o intermediário; por exemplo, algo é verdadeiro em uma certa medida (um copo está um tanto cheio) ou inteiramente verdadeiro



(o copo está cheio), ou inteiramente falso (o copo está vazio). Um conjunto difuso é isso, nada é totalmente verdadeiro, assim como nada é totalmente falso. A lógica difusa utiliza valores contínuos e não discretos para representar a pertinência dos seus elementos nos conjuntos. As Figuras 7 e 8, mostram as funções de conjunto mais utilizadas na lógica:

a) Triangular



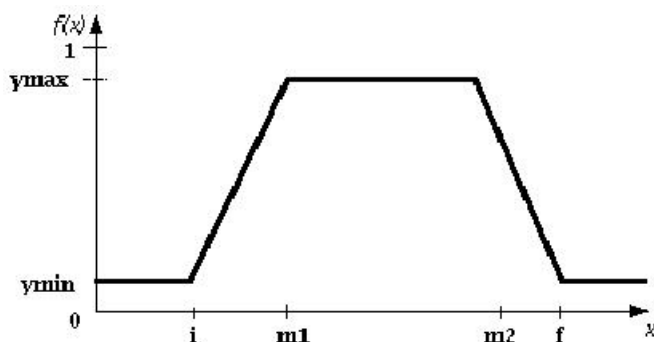
**Figura 7 - Representação da função triangular na lógica difusa.**

*Fonte: MUNAKATA, 1998.*

Onde:

**y min** é o menor valor possível para a função, **y max**, o maior valor, **i**, o início da ascendente da função, **m**, o valor de máximo, e **f**, o final da descendente.

b) Trapezoidal



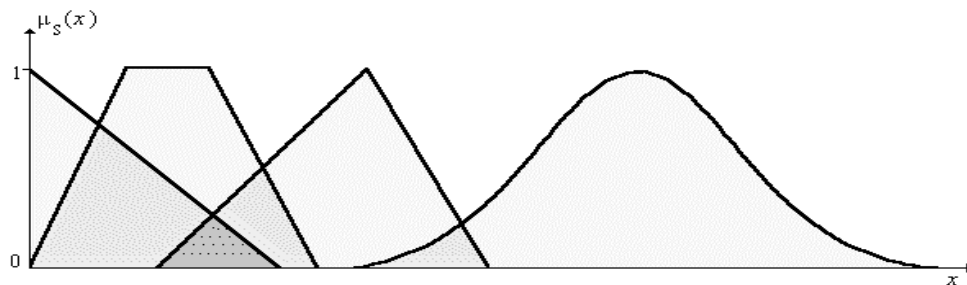
**Figura 8 - Representação da função trapezoidal na lógica difusa.**

*Fonte: MUNAKATA, 1998.*

Onde:

**y min** é o menor valor possível para a função, **y max**, o maior valor, **i**, o início do trapézio, **m1**, o início do intervalo de máximo, **m2**, o fim do intervalo de máximo, e **f**, o final do trapézio.

A Figura 9, demonstra outros exemplos de conjuntos de pertinência que podem ser usados:



**Figura 9 - Diferentes conjuntos fuzzy de pertinência dentro de um mesmo universo x.**

*Fonte: BORGES, 1996.*

Algumas vantagens em se utilizar a lógica *fuzzy*: é de fácil entendimento; é flexível, tolerante a dados imprecisos; pode modelar funções não-lineares; é construída com a mais alta experiência de um especialista; baseia-se em linguagem natural.

### 3.4. TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

Na Teoria Clássica dos Conjuntos, um elemento pertence ou não a um determinado conjunto. Assim, pode-se definir a pertinência de um elemento particular  $x$  de um conjunto  $S$  através da função:

$$f_S : S \rightarrow \{0,1\}$$

$f_S$  combina os elementos do conjunto  $S$  para 1 ou 0

Então:  $x$  de  $S$ ,

$$\begin{cases} 1 & \text{se } x \in S \\ 0 & \text{se } x \notin S \end{cases}$$

Em contrapartida, o grau de pertinência dos elementos de um conjunto na Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*, é especificado por um número no intervalo  $[0,1]$ . O valor 1 é atribuído aos elementos que estritamente pertencem ao conjunto, e 0, para os que não pertencem. Um conjunto *fuzzy*  $A$  em um universo  $U$  é definido por uma função de pertinência:

$$\mu_A(x): U \rightarrow [0,1]$$

e representado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{ \mu_A(x)/x \}, x \in U \quad (1)$$

A fuzzyficação consiste na atribuição de um grau de pertinência no intervalo  $[0,1]$  a uma variável, dentre um conjunto de elementos classificadores. Com isso, classifica-se a variável com um termo lingüístico (um adjetivo) e cria-se uma semântica a partir de elementos matemáticos. A classificação da variável é feita por uma função de pertinência.

A Tabela 1, mostra um exemplo de adjetivos *fuzzy*, caracterizando funções de pertinência de uma variável 'x'.

**Tabela 1 - Exemplo de adjetivos fuzzy**

Adjetivo	Significado
MN	Muito Negativo
PN	Pouco Negativo
ZE	Zero
PP	Pouco positivo
MP	Muito Positivo

### 3.4.1. Operações Básicas e Propriedades Fuzzy

Considerando conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  em um universo  $U$ , e  $\forall x \in U$ , tem-se:

$$\text{União: } A \cup B = \{x \mid \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \mid x \in U \}$$

$$\text{Interseção: } A \cap B = \{x \mid \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \mid x \in U \}$$

$$\text{Complemento: } A' = \{x \mid (1 - \mu_A(x)) \mid x \in U \}$$

Utilizando as definições de união, interseção e complemento, é possível verificar que as propriedades algébricas, aplicadas na Teoria Clássica dos Conjuntos, também se aplicam aos conjuntos *fuzzy*.

Comutativa:  $A \cup B = B \cup A$

$$A \cap B = B \cap A$$

Associativa:  $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$

$$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$$

Distributiva:  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

De Morgan:  $(A \cup B)' = A' \cap B'$

$$(A \cap B)' = A' \cup B'$$

Involução (duplo complemento):  $(A')' = A$

Idempotência:  $A \cup A = A$

$$A \cap A = A$$

Identidade:  $A \cup \emptyset = A$        $A \cup U = U$

$$A \cap \emptyset = \emptyset$$

$$A \cap U = A$$

Onde,  $(\emptyset)$  representa o conjunto vazio =  $\{x / 0,0 \mid x \in U\}$  e

$U$ : Universo =  $\{x / 1,0 \mid x \in U\}$

### 3.4.2. Operações Reservadas aos Conjuntos Fuzzy

Nas operações com conjuntos *fuzzy*, utilizam-se os conceitos de norma triangular (norma-t) e co-norma triangular (co-norma-t ou norma-s).

Uma norma-t é uma função  $\tau: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  tal que,  $\forall x, y, z, w \in [0,1]$ :

- 1)  $x \tau w \leq y \tau z$ , se  $x \leq y$  e  $w \leq z$
- 2)  $x \tau y = y \tau x$
- 3)  $(x \tau y) \tau z = x \tau (y \tau z)$
- 4)  $x \tau 0 = 0$ ;  $x \tau 1 = x$

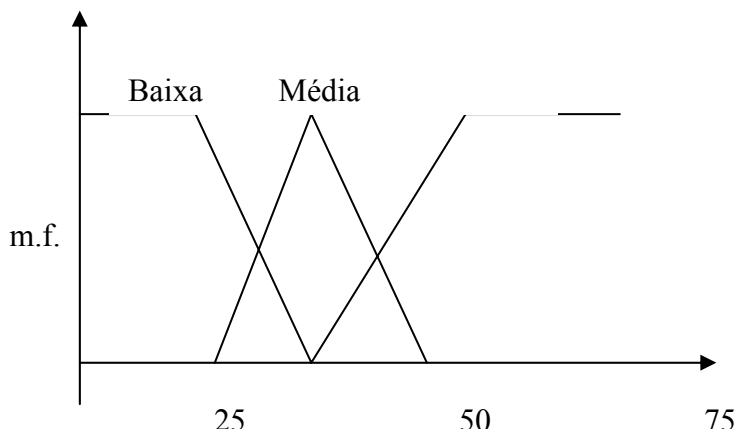
Uma co-norma-t, do tipo  $\zeta: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$  satisfaz 1, 3 e a 4:

$$x \zeta 0 = x; \quad x \zeta 1 = 1$$

Normas-t incluem o mínimo (min ou  $\wedge$ ) e o produto algébrico, co-normas-t o máximo (max ou  $\vee$ ) e a soma limitada ( $\oplus$ ).

### 3.4.3. Variáveis Lingüísticas

Uma variável lingüística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um determinado processo poderia ser uma variável lingüística assumindo valores *baixa*, *média*, *alta* etc. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, conforme mostrado na Figura 10.



**Figura 10 – Exemplo de variável lingüística.**

Generalizando, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande, zero, por exemplo), de conectivos lógicos (negação NÃO, conectivos E e OU, conectivos mascarados, como: mas ou porém), de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente) e de delimitadores (parênteses).

Os termos primários estão associados diretamente a conjuntos *fuzzy*, que são usualmente definidos através das:

- Funções de pertinência analíticas;
- Funções de pertinência lineares por partes, resultando em formas triangulares ou trapezoidais;
- Funções de pertinência discretas.

A negação NÃO e os conectivos E e OU podem ser definidos em termos das operações de complemento, intercessão e união, respectivamente.

#### 3.4.4. Proposição Fuzzy

Uma frase da forma (K é A), onde K é o nome de uma variável lingüística e A é um conjunto *fuzzy* definido no universo de discurso  $U$  de K, é chamada de proposição *fuzzy*. No caso mais geral de uma proposição *fuzzy* n-ária, a representação se dá através do produto cartesiano das variáveis lingüísticas e da utilização de relações *fuzzy* em vez de conjuntos *fuzzy*.

Proposições *fuzzy* podem ser combinadas por meio de diferentes operadores, como, por exemplo, os conectivos lógicos E e OU, e o operador de implicação SE ... ENTÃO; as proposições *fuzzy* daí resultantes podem ser descritas em termos de relações *fuzzy*. O valor de uma relação *fuzzy*, em função dos conjuntos *fuzzy* de cada operando, pode ser determinado de inúmeras maneiras (GALVÃO et al., 1999).

Considere as variáveis lingüísticas de nomes  $x$  e  $y$ , com universos de discurso  $X$  e  $Y$ , respectivamente, conjuntos *fuzzy*  $A$  e  $B$  definidos, respectivamente, em  $X$  e  $Y$ , e as proposições *fuzzy* ( $x$  é  $A$ ) e ( $y$  é  $B$ ). Conectando-se essas proposições através do operador OU,

tem-se  $(x \text{ é } A) \text{ OU } (y \text{ é } B)$ , que pode ser escrito  $((x,y) \text{ é } R_{A \text{ OU } B})$ , onde  $R_{A \text{ OU } B}$  é uma relação *fuzzy* em  $X \times Y$ , determinada por uma função  $f_{\text{OU}}$  (usualmente uma co-norma-t):

$R_{A \text{ OU } B} = \{\mu_R(x,y) / (x,y)\}$ , tal que:

$$\mu_R(x,y) = f_{\text{OU}}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2)$$

Conectando-se as proposições através do operador E, tem-se  $((x,y) \text{ é } R_{A \text{ E } B})$ , onde:

$R_{A \text{ E } B} = \{\mu_R(x,y) / (x,y)\}$ , tal que:

$$\mu_R(x,y) = f_E(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3)$$

$f_E$  é usualmente uma norma-t

O operador SE ... ENTÃO é também conhecido como declaração condicional *fuzzy* e descreve a dependência do valor de uma variável lingüística em relação ao valor de outra. Em muitas aplicações, as declarações condicionais são simplesmente denominadas de regras lingüísticas e são, normalmente, frases da forma SE  $(x \text{ é } A)$  ENTÃO  $(y \text{ é } B)$ .

Esta frase, normalmente denominada de *implicação*, pode ser reduzida a uma proposição *fuzzy* binária  $((x,y) \text{ é } R_{A \rightarrow B})$ , onde:

$R_{A \rightarrow B} = \{\mu_R(x,y) / (x,y)\}$ , tal que:

$$\mu_R(x,y) = f \rightarrow (\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4)$$

$f \rightarrow$ : operador (ou função) de implicação.

Quando uma declaração condicional apresenta mais do que uma variável antecedente, por exemplo:  $(x \text{ é } A)$ , as diversas variáveis são combinadas através do conectivo E:

SE  $((x_1 \text{ é } A_1) \text{ E } (x_2 \text{ é } A_2) \text{ E } \dots \text{ E } (x_m \text{ é } A_m))$  ENTÃO  $(y \text{ é } B)$

reduz a:  $((x_1, x_2, \dots x_m, y) \text{ é } R)$ .

A função de pertinência é:

$$\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_m, y) = f \rightarrow (f_E(\mu_{A1}(x_1), \mu_{A2}(x_2), \dots, \mu_{Am}(x_m)), \mu_B(y)) \quad (5)$$

Várias declarações podem ser combinadas também através do conectivo OU, por exemplo:

SE (x é A<sup>1</sup>) ENTÃO (y é B<sup>1</sup>)

ou

SE (x é A<sup>2</sup>) ENTÃO (y é B<sup>2</sup>)

Ou seja:

((x,y) é R<sup>N</sup>): ((x,y) é R<sup>1</sup>) OU ((x,y) é R<sup>2</sup>) OU ... OU ((x,y) é R<sup>n</sup>).

A função de pertinência é:

$$\mu_{RN}(x,y) = f_{OU}(\mu_{R^1}(x,y), \mu_{R^2}(x,y), \dots, \mu_{RN}(x,y)) \quad (6)$$

Como aqui mencionado, o conceito de lógica *fuzzy* foi inspirado na lógica tradicional booleana; a extensão da lógica tradicional para a lógica *fuzzy* foi efetuada através da simples substituição das funções de pertinência bivalentes, da primeira, por funções de pertinência *fuzzy*, assim como, a semelhança da extensão de conjuntos ordinários para conjuntos *fuzzy*.

### 3.4.5. Inferência Fuzzy

A função de pertinência  $\mu_R(x,y)$  mede o “grau de verdade” da relação de implicação entre x e y. Exemplos dessa função de pertinência são:

$$\mu_R(x,y) = 1 - \min[\mu_A(x), 1 - \mu_B(y)] \quad (7)$$

$$\mu_R(x,y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (8)$$

Quanto à inferência, o *Modus Ponens* é estendido para o *Modus Ponens Generalizado*, descrito da seguinte forma:



Premissa 1:  $x \text{ é } A^*$

Premissa 2:  $\text{SE } x \text{ é } A \text{ ENTÃO } y \text{ é } B$

Consequência:  $y \text{ é } B^*$

No *Modus Ponens* Generalizado, o conjunto *fuzzy*  $A^*$  não é necessariamente o mesmo que  $A$  (antecedente da regra), assim como  $B^*$  não é necessariamente o mesmo que o consequente  $B$ .

Na lógica tradicional, uma regra será "disparada" somente se a Premissa 1 for exatamente o antecedente da regra, e o resultado será exatamente o consequente dessa regra. Na lógica *fuzzy*, uma regra será disparada se houver um "grau de similaridade" diferente de zero entre a Premissa 1 e o antecedente da regra; o resultado será um consequente com grau de similaridade não nulo em relação ao consequente da regra.

Segue exemplo de regras na Tabela 2, de inferência *fuzzy*, supondo uma variável de saída  $y$ :

**Tabela 2 - Exemplo de regras de Inferência para entrada 'x' e saída 'y'**

	Antecedente		Consequente
SE	X é MN	ENTÃO	Y é Positivo
SE	X é PN	ENTÃO	Y é Pouco Positivo
SE	X é ZE	ENTÃO	Y é Zero
SE	X é PP	ENTÃO	Y é Pouco Negativo
SE	X é MP	ENTÃO	Y é Negativo

Usualmente, associam-se min e max aos operadores  $f_E$  e  $f_{OU}$ , respectivamente. De um modo geral, são usadas normas-t em associação com  $f_E$  e co-normas-t em associação com  $f_{OU}$ . Na regra de inferência composicional, a norma-t mais utilizada é min, dando origem à regra de inferência: max-min (ou sup-min).

Como exemplo, considera-se duas regras do tipo SE ( $x \text{ é } A_i$ ) ENTÃO ( $y \text{ é } B_i$ ), uma entrada do tipo singleton  $x = x'$ , conjuntos *fuzzy* definidos por funções de pertinência triangulares, tanto no antecedente como no consequente, regra de inferência max-min implicação min, e  $f_{OU}$  representado por max. A função de pertinência  $\mu_{B^*}(y)$  é dada por:

$$\mu_{B^*}(y) = \vee x (\mu_{A^*}(x) \wedge \mu_{RN}(x,y)) \quad (9)$$

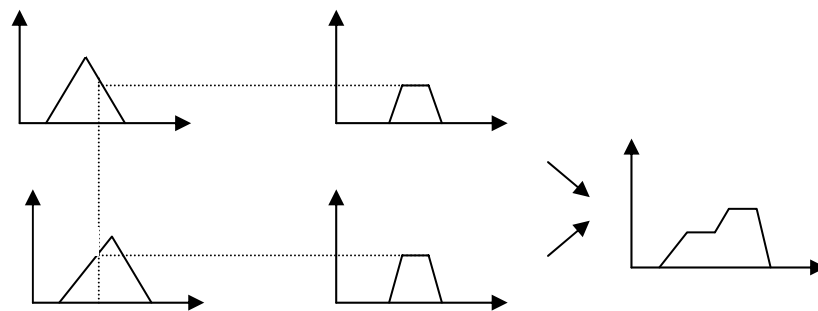
Onde:

$$\mu_{RN}(x,y) = \vee [(\mu_{A1}(x) \wedge (\mu_{B1}(y))), (\mu_{A2}(x) \wedge \mu_{B2}(y))] \quad (10)$$

Como  $\mu_{A^*}(x) = 1$  para  $x = x'$  e igual a zero, tem-se:

$$\mu_{B^*}(y) = \vee x (1 \wedge \mu_{RN}(x',y)) = \mu_{RN}(x',y) = \vee [(\mu_{A1}(x') \wedge (\mu_{B1}(y))), (\mu_{A2}(x') \wedge (\mu_{B2}(y)))] \quad (11)$$

Este procedimento é ilustrado como mostra a Figura 11:



**Figura 11 - Mecanismo de inferência fuzzy.**

*Fonte: MUNAKATA, 1998.*

### 3.5. SISTEMAS ESPECIALISTAS - SE

Os sistemas baseados no conhecimento são sistemas de Inteligência Artificial que utilizam as técnicas de engenharia de conhecimento para a construção da base de dados do programa. Os sistemas especialistas são tradicionalmente vistos como sistemas de suporte à decisão, pois são capazes de tomar decisões como especialistas em diversas áreas. Os SE são também conhecidos por sistemas cognitivos.

Um SE é um programa inteligente de computador que usa conhecimento e procedimentos de inferências, para resolver problemas que são bastante difíceis, de forma a requererem muita perícia humana (MUNAKATA, 1998).

O conhecimento de um SE consiste em fatos e heurísticas. Os fatos constituem um corpo de informação que é largamente compartilhado, publicamente disponível e geralmente aceito pelos especialistas em um campo. As heurísticas são em sua maioria privadas, regras pouco discutidas de bom discernimento (regras do raciocínio plausível, regras da boa conjectura), que caracterizam a tomada de decisão em nível de especialista na área (MUNAKATA, 1998).

Os SE apresentam um ciclo de crescimento definido: eles podem iniciar e terminar através de uma implementação simples na solução de um problema específico ou iniciar como um protótipo experimental e terminar com a implementação de uma grande base de conhecimentos, onde aspectos relacionados com o tratamento das informações imprecisas são verificadas com a utilização de teoremas específicos que trabalham estas informações.

Os sistemas especialistas são caracterizados por:

- utilizar lógica simbólica, ao invés de cálculos numéricos;
- incorporar uma base de conhecimento explícita;
- ter capacidade para explicar suas conclusões.

Um SE é aquele projetado e desenvolvido para atender a uma aplicação determinada e limitada do conhecimento. É capaz de emitir uma decisão, apoiado em conhecimento justificado, a partir de uma base de informações, tal qual um especialista de determinada área do conhecimento humano.

### **3.5.1. Classificação dos SE**

Por sua flexibilidade no modo de como pode ser empregado, os SE se classificam em categorias, baseadas na função a ser exercida pelo sistema. Isso possibilita ao usuário restringir seu campo de pesquisa acerca do sistema mais adequado à sua necessidade. Eis as categorias:

- Interpretação - São sistemas que inferem descrições de situações a partir da observação de fatos, fazendo uma análise de dados e procurando determinar as relações e seus significados.
- Diagnósticos - São sistemas que detectam falhas oriundas da interpretação de dados.
- Predição - A partir de uma modelagem de dados do passado e do presente, este sistema permite uma determinada previsão do futuro.
- Planejamento - O sistema prepara um programa de iniciativas a serem tomadas para se atingir um determinado objetivo.
- Projeto - É um sistema capaz de justificar a alternativa tomada para o projeto final, e de fazer uso dessa justificativa para alternativas futuras.
- Depuração - Trata-se de sistemas que possuem mecanismos para fornecer soluções para o mau funcionamento provocado por distorções de dados.
- Reparo - Este sistema desenvolve e executa planos para administrar os reparos verificados na etapa de diagnóstico.
- Instrução - O sistema de instrução tem um mecanismo para verificar e corrigir o comportamento do aprendizado dos estudantes.
- Controle - É o mais completo de um modo geral, pois deve interpretar os fatos de uma situação atual, verificando os dados passados e fazendo uma predição do futuro. Apresenta os diagnósticos de possíveis problemas, formulando um plano ótimo para sua correção. Este plano de correção é executado e monitorado, para que o objetivo seja alcançado.

### **3.5.2. Características de um SE**

Para que um sistema seja considerado especialista, (FARRENY, 1985 apud MUNAKATA, 1998) destaca alguns componentes essenciais à sua composição:

- uma Linguagem de expressão dos conhecimentos fornecidos pelos especialistas;

- uma Base de Conhecimentos para armazenar o conhecimento específico de determinada aplicação, que pode ser diretamente fornecido por um especialista ou acumulado pelo sistema ao fim dos experimentos;
- um Motor de Inferência, programa relativamente geral, que explora o conhecimento da base precedente, considerando-a como fonte de informações, assim suscetível a mudanças.

Os SE são implementados em ferramentas computacionais, denominadas shells, especialmente projetadas para a engenharia do conhecimento, a fim de facilitar a construção dos sistemas.

Entendemos então que os SE são construções de software, que os peritos em campos específicos enriquecem com seu conhecimento. Destilando sua perícia em grupos de leis e inserindo-as nos sistemas, os peritos produzem programas de aplicações, que auxiliam os não-peritos a resolver problemas especialistas, respondendo a perguntas deste programa.

De acordo com (CHORAFAS, 1988 apud MUNAKATA, 1998) “O computador interage com as perguntas do usuário e chega a uma conclusão baseada nas respostas. O usuário pode perguntar ao computador por que ele quer certa informação e o SE explicará sua necessidade dos dados e como eles serão utilizados. O mais importante é que o SE dirá como chegou às suas conclusões; não dará somente conselhos, mas também justificará a opinião que oferece”.

### **3.5.3. Benefícios de um Programa Baseado no Conhecimento**

Levando em consideração que os humanos podem esquecer-se de fatores relevantes, especialmente se estão sob estresse ou num período crítico, as máquinas inteligentes são de maior confiabilidade, pois não se esquecem e são imunes a pressões, além de serem dotadas destas capacidades:

- velocidade na determinação do problema;
- tempo de resposta adequado;
- flexibilidade;

- estabilidade;
- integração de ferramentas;
- não emocionais;
- tutor inteligente;
- raciocínio simbólico;
- decisão fundamentada em uma base de conhecimentos;
- servem de ajuda no treinamento de pessoal;
- combina o conhecimento com a velocidade e precisão de uma máquina.

#### **3.5.4. Aplicações de um SE**

As aplicações de SE devem ser dirigidas por metas ou por dados, dependendo se as causas ou conseqüências dos fatos conhecidos devem ser inferidos. Os exemplos de análise incluem a interpretação, a previsão e a monitoria.

Os SE também são utilizados em tarefas caracterizadas pela perícia, que é normalmente direcionada à meta. A perícia envolve a reunião de ações, eventos ou objetos, para a construção de um plano ou a resolução de problemas mais complexos.

A instrução auxiliada pelo computador e o controle de processo são áreas de aplicação que requerem tanto análise como síntese. Os SE também podem ser utilizados como ferramentas de acesso e de interface. Em tais aplicações, funcionam como meio de diálogo, assegurando que todas as perguntas sejam feitas apropriadamente e uma comunicação de mão dupla seja eficientemente estabelecida.

#### **3.5.5. Considerações sobre SE**

Se os SE são hoje orientados à resolução de problemas interdisciplinares de um mesmo setor de atividades, sua utilização inegável envolverá provavelmente sua proliferação

como um sistema de informação. A programação tradicional será enriquecida com as técnicas de base dos SE, o que liberará o indivíduo de tarefa mental, permitindo o desenvolvimento de softwares cada vez mais complexos.

### **3.6. ADAPTANDO SISTEMA ESPECIALISTA AO SSD**

A necessidade de integrar tarefas de tomada de decisão e de representação do conhecimento, utilizando processos de inferência, que modelem o conhecimento especialista, tem provocado muitos esforços no sentido de integrar SSD e SE baseado no conhecimento, para formar os SSD inteligentes (MENTZAS<sup>1</sup>, 2002).

Várias formas de integração têm sido examinadas e várias arquiteturas de sistemas têm sido propostas. Assim como os SE, outras formas de sistemas baseados em computador têm sido desenvolvidas, com a finalidade de amparar os tomadores de decisões e o gerenciamento de informações.

A necessidade de unir essas ferramentas deve-se às limitações dos SE. A preocupação desse estudo foi com a natureza estática dos tradicionais sistemas especialistas, a interface de diálogo, pergunta-resposta, o qual, muitas vezes, deixa de fornecer o de que o tomador de decisão necessita (RICHARDS & McDONALD, 2002).

Em (LANGLOTZ & SHORTLIFFE, 1983 apud RICHARDS & McDONALD, 2002) tem-se que: se o conhecimento é preciso e confiável, a opinião depois de capturada se torna de pouca utilidade e gasta-se recursos, mesmo se a interação com o sistema for considerada inadequada.

Em contrapartida, os softwares de SSD têm encontrado bastante aceitação. Entretanto, não carregam embutidos em sua arquitetura a opinião do especialista, sendo desservido nesse ponto, tornando incapazes de uma modelagem qualitativa. Porém, a principal causa da aceitação dos SSD é o alto grau de controle que o usuário detém sobre o sistema.

A Tabela 3 mostra que ambas as tecnologias de SE e SSD oferecem diferentes maneiras de resolver um determinado problema. Nota-se que os SE estão mais voltados para instruções da máquina, enquanto que os SSD interagem mais com o usuário. A união dessas, pode gerar um sistema bem balanceado.

**Tabela 3 - Comparação dos DSS e ES**

	SSD	SE
Objetivo	Auxiliar o usuário na tomada de decisão	Repetir o conselho especialista
Quem aconselha?	O humano e/ou sistema	O Sistema
Maior orientação	Toma decisão	Transfere a experiência
Maior direção de perguntas	Homem pergunta p/ máquina	Máquina pergunta p/ homem
Natureza do suporte	Pessoal / grupo	Pessoal (principalmente) / grupo
Métodos de manipulação	Numérico	Simbólico
Características do problema da área	Complexo, amplo	Limitado / domínio
Tipos de problemas	Direto ao assunto	Repetitivo
Conteúdo da base - dados	Conhecimento relativo	Conhecimento relativo e procedural
Desenvolvedor	Usuário	Engenheiro do conhecimento e especialista
Método de desenvolvimento	Protótipo	Protótipo
Capacidade de Raciocínio	Não possui	Sim, limitado
Explicação do conhecimento	Limitado	Sim

*Fonte: Adaptado de TURBAN (1993).*

Baseado nas pesquisas verifica-se que é possível incorporar processos diferentes na tarefa de decisão, oferecendo ao usuário conhecimento técnico para executar diferentes cenários de resolução. A vantagem dessa incorporação de tecnologias está na definição do sistema, que reunirá a experiência, o bom-senso do analista e a opinião dos envolvidos no problema.

Dessa forma, a IA, unindo-se aos sistemas de computação, poderá ser capaz de oferecer um âmbito de soluções com o objetivo de satisfazer às necessidades de decisão aos processos de informações e às organizações mais modernas.



## **4. APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO**

O propósito deste capítulo é deixar o leitor familiarizado com a abordagem multicritério, fornecendo uma visão geral do campo e suas técnicas de apresentação.

### **4.1. ANÁLISE DE DECISÃO**

A análise de decisão é uma filosofia, articulada por um conjunto de axiomas e procedimentos, que visam a analisar a complexidade inerente a problemas de decisão. O processo de decisão é caracterizado por quatro fases fundamentais: estruturação do problema, avaliação das possíveis consequências das alternativas, determinação do valor das preferências dos decisores, avaliação e comparação das alternativas (RUDOLPHI, 2000).

O principal objetivo da análise de decisão é auxiliar o decisor a tomar as “melhores” decisões, através de um processo interativo de informações entre analistas e decisores envolvidos no problema.

#### **4.1.1. Análise de Decisão Multicritério**

A análise de decisão multicritério está constituída segundo (VINCKE, 1992 apud RUDOLPHI, 2000) por uma infinidade de métodos que herdaram características e influências da teoria da utilidade econômica à programação matemática. Assim, o campo da tomada de decisão multicritério é simultaneamente abrangente e variado.

Segundo (RUDOLPHI, 2000) a Análise de Decisão Multicritério (ADMC) pode ser subdividida em três distintas categorias: Programação Matemática Multicritério (PMMC), Tomada de Decisão Multiobjetivo (TDMO) e Tomada de Decisão Multiatributo (TDMA).

Na PMMC, as avaliações requerem uma grande quantidade de objetivos e dados qualitativos, semelhante à Programação Objetiva; os métodos da PMMC são exigentes e complexos nas suas operacionalizações.

Na TDMO, as operações contam com algoritmos matemáticos de grande escala, possibilidades infinitas e conjuntos de alternativas. As soluções são predominantemente definidas em torno da identificação da simples solução ótima.

Na TDMA, os espaços das alternativas disponíveis são discretos, predeterminados e finitos. As escolhas das alternativas são forçadas e os métodos não resolvem o problema através da solução ótima. Os tomadores de decisão indicam as soluções possíveis e trabalham para alcançar a solução satisfatória dentro das alternativas avaliadas.

#### **4.1.2. A Tomada de Decisão Multicritério**

A tomada de decisão multicritério é um esforço para tentar resolver problemas de objetivos conflitantes, cuja presença impede a existência da solução ótima e conduz à procura do melhor compromisso. O processo de decisão requer a existência de um conjunto de alternativas factíveis para sua composição, onde cada decisão de escolha de uma alternativa factível tem associado um ganho e uma perda (GOMES & GOMES, 2002).

A tomada de decisão pode ser evidenciada nas mais simples atitudes diárias; muitos problemas da vida real envolvem múltiplas medidas de desempenho ou objetivos. “Quem nunca tomou uma decisão com base em muitos critérios?”

Raramente, uma decisão é tomada em função de um único objetivo; por exemplo, quando se vai comprar um equipamento de uso doméstico, nós não utilizamos puramente o critério de mínimo custo; outros fatores pesam na decisão, como a durabilidade do produto, o tempo de garantia, o modelo etc.

O ser humano vê-se assim obrigado a tomar decisões, ora usando parâmetros quantitativos ora qualitativos, de mensuração mais subjetiva. Normalmente, os parâmetros quantitativos são mais fáceis de se definir; nesse momento, o tomador de decisão necessita vislumbrar as conseqüências das decisões em um meio ambiente mutável e sujeito a condições que não pode controlar, bem como a incertezas, imprecisões e ambigüidades.

De fato, o ser humano tem a constante necessidade de tomar decisões, e, assim, se realiza através da comparação, classificação e ordenação de alternativas; cada qual no seu ponto de vista, observa em algumas situações, que diferentes decisores escolhem diferentes

caminhos de solução para problemas idênticos; isso prova mais uma vez que cada decisor aponta uma importância diferente para cada critério em análise.

As decisões normalmente buscarão minimizar perdas, maximizar ganhos e criar uma situação em que, comparativamente, o decisor julgue que houve uma elevação, ou seja, houve um ganho entre o estado da natureza em que se encontrava e o que virá após implementar-se a decisão.

## **4.2. A ORIGEM DA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

Desde os primórdios, o homem sempre teve que tomar decisões, fossem elas conscientes ou inconscientes, racionais ou irracionais. A todo instante é colocado numa posição, onde é necessário decidir, optar, tomar uma posição frente a uma ou a várias escolhas.

Não se tem conhecimento de, exatamente, quando, pela primeira vez, o homem decidiu estudar os princípios econômicos para subsidiar o processo decisório. Entretanto, sabe-se que, antes dos anos 40, já existiam pesquisadores e estudiosos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta área, preocupados com a racionalidade do processo decisório. Até o final dos anos 40, a tomada de decisão era feita através de análises criteriosas, efetuadas com base em princípios econômicos.

Porém, os conceitos econômicos eram voltados às teorias baseadas em suposições extremamente simplificadas da realidade e se tornava de difícil aplicação nas empresas, pois a teoria econômica estava mais preocupada com os problemas da economia como um todo, deixando de lado os problemas econômicos básicos das empresas.

Trabalhos em equipes multidisciplinares também não eram suficientemente aceitos e divulgados. A partir de 1950, aumenta o interesse em aproximar os princípios econômicos com a prática do processo decisório; começa, então, a preocupação em adequar métodos de análise de alternativas em cursos de ação.

Na década de 60, surgem métodos probabilísticos voltados para a tomada de decisão; estes foram aplicados em diversos trabalhos técnicos, desenvolvidos até a década passada, mas que estão sendo suplantados por métodos cuja matemática é menos complexa, a

transparência é inegavelmente maior e são corretos do ponto de vista científico, pois são fundamentados em axiomas rigorosos (GOMES, 1998).

Um número crescente de organizações, interessadas em análise de decisões, começam a aparecer, surgem instituições de várias áreas com grupos de apoio à tomada de decisão; desses fazem parte matemáticos, estatísticos, cientistas da computação, economistas e especialistas em pesquisa operacional.

Na década de 70, uma nova fase do processo de apoio à decisão começou a tomar forma e a iniciar uma comunidade científica, antes dispersa, interessada pelo domínio do multicritério. Em 1975, Roy organizou o primeiro encontro *Euro Working Group on Multicriteria Aid for Decisions*, em Bruxelas, e Hervé Thiriez e Stanley Zionts organizaram a primeira conferência, que, mais tarde, tornou-se a *International Society on Multiple Criteria Decision Making*.

Desta maneira, nascem paralelamente duas correntes científicas de apoio à tomada de decisão: a americana, que mais tarde virá a ser conhecida como a *Multiple Attribute Utility Theory* (MAUT) e a européia ou francesa.

Essas escolas concordavam que, para tomar uma decisão que se aproximasse o mais possível da realidade, era necessário considerar, além dos fatores econômicos-financeiros, os valores subjetivos inerentes ao processo humano de tomada de decisão.

#### **4.2.1. As Correntes Científicas**

As diferentes escolas de decisão multicritério se baseiam nos princípios dos processos de modelização das preferências. São elas:

1. Escola Americana ou MAUT: se destaca por ter sido o primeiro quadro de referência teórico coerentemente desenvolvido, bem como pela sua grande utilização em nível mundial;
2. Métodos de Subordinação e Síntese ou Escola Francesa ou Escola Européia;
3. Métodos Interativos ou de Programação Matemática Multiobjetivo;

4. Métodos voltados para a Tomada de Decisão em Grupo ou fundamentados na Teoria da Negociação;
5. Métodos Híbridos, que utilizam os conceitos tanto da Escola Americana como da Escola Francesa, simultaneamente.

Dessa maneira, os métodos multicritério se dividiram em classes:

Classe I - Escola Americana:

Onde o valor cardinal de uma alternativa ( $a_i$ ) é formado por um conjunto de valores ( $v_{1i}, v_{2i}, \dots, v_{ni}$ ), onde cada ( $v_{ni}$ ) é o valor assumido pela alternativa ( $a_i$ ) em cada um dos ( $n$ ) critérios. Isto significa que, caso um determinado critério ou atributo seja considerado pouco importante diante de outros critérios ou atributos, ele receberá um peso ou valor atribuído, inferior ao peso atribuído àqueles de maior importância (GOMES & GOMES, 2002).

A teoria defendida pela escola americana admite definir uma função que busque agregar os valores das alternativas, segundo cada critério. Isto reflete o fato de que a importância relativa de cada critério advém do conceito de taxa de substituição ou trade-off. O decisor defronta-se, ainda, com o problema de identificação da taxa de substituição de um critério em relação ao outro. Esta abordagem exclui a incomparabilidade.

Esta teoria assume que:

- a) todos os estados são comparáveis, isto é, não se admite a situação de incomparabilidade;
- b) existe transitividade na relação de preferências;
- c) existe transitividade nas relações de indiferença.

Classe II - Métodos de Subordinação e Síntese:

São aplicados à comparação entre alternativas discretas, onde existe a relação de prevalência de síntese aceitando a incomparabilidade; são também conhecidos como método da Escola Francesa.

O decisor pode deparar-se com uma das quatro situações, ao comparar duas alternativas:

- a) uma alternativa é preferida à outra com preferência forte, também denominada preferência sem hesitação;
- b) uma alternativa é preferida à outra com preferência fraca, também denominada preferência com hesitação;
- c) uma alternativa é indiferente à outra;
- d) uma alternativa é incomparável à outra.

Não existe, neste caso, uma função de valor ou de utilidade. Existem, no entanto, as preferências dos decisores, mas não existe transitividade de preferências e/ou de indiferenças. A utilização destes métodos não pressupõe uma definição de preferências por parte do decisor ao iniciar o processo de decisão.

O uso dos Métodos de Subordinação, ao invés da Teoria Americana, pode ser motivado pela impossibilidade ou dificuldade de se estabelecer uma função de utilidade e também pelo fato de a agregação da Escola Francesa facilitar a comparação da agregação *a priori* e *a posteriori* (GOMES, 1998).

Sobre a modelagem de preferências, diz-se que esta:

- a) permite ordenar (pelo menos parcialmente) as alternativas em termos relativos, mesmo quando a informação de que se dispõe sobre as preferências paritárias, critério a critério, é pobre; no entanto, não é possível a indicação do mérito global de cada alternativa;
- b) permite quatro diferentes formas de comparação entre alternativas: preferência sem hesitação, preferência com hesitação, indiferença e incomparabilidade;
- c) não necessita da criação de uma função de utilidade, utilizando-se de comparações paritárias e grafos nucleados (isto é, com kernel) para representar a dominância das alternativas;
- d) não pressupõe transitividade; pressupõe, isto sim, subordinação e comparação entre alternativas.

A Escola Francesa adota as seguintes convicções básicas:

- a) onipresença da subjetividade no processo decisório;
- b) paradigma da aprendizagem pela participação;
- c) convicção do construtivismo;
- d) reconhece as limitações do ótimo matemático e utiliza uma abordagem que não parte de quaisquer pré-condições, mas que procura construir um modelo de elementos-chave que capacitam os atores do processo de decisão a evoluir no processo decisório, como resultado puro e simplesmente dos seus próprios objetivos, convicções e sistemas de valores.

A Escola Francesa permite uma modelagem mais flexível do problema, pois não admite necessariamente a comparabilidade entre todas as alternativas, além de não imporem ao analista de decisões uma estruturação hierárquica dos critérios existentes.

Alguns autores fazem a seguinte comparação: a Escola Francesa tende o seu foco de estudo para metodologias onde as preferências pessoais dos decisores tenham menor influência na alternativa escolhida e em contrapartida, a Escola Americana buscaria métodos para melhor explicitar esta preferência, que teria uma grande influência na escolha final. Ainda afirmam que uma boa decisão só será possível se as duas influências forem equilibradas.

### Classe III - Métodos Interativos:

Aplicados em Sistemas Informáticos Interativos, os quais têm objetivo de apoiar e melhorar os processos de decisão, especialmente em tarefas complexas e mal estruturadas que requerem a apreciação crítica e o julgamento dos agentes de decisão. Os métodos interativos, com interações de tentativa e erro, subdividem-se em:

- a) métodos de pesquisa de linha;
- b) métodos de redução de espaço de pesos (também denominados de coeficientes de peso);
- c) métodos de redução do espaço das funções objetivo;
- d) métodos de contração de cone dos gradientes das funções objetivo.

#### Classe IV – Métodos Híbridos:

Classificação atribuída aos métodos que utilizam conceitos de duas ou mais das escolas anteriores.

#### Classe V – Métodos Alternativos:

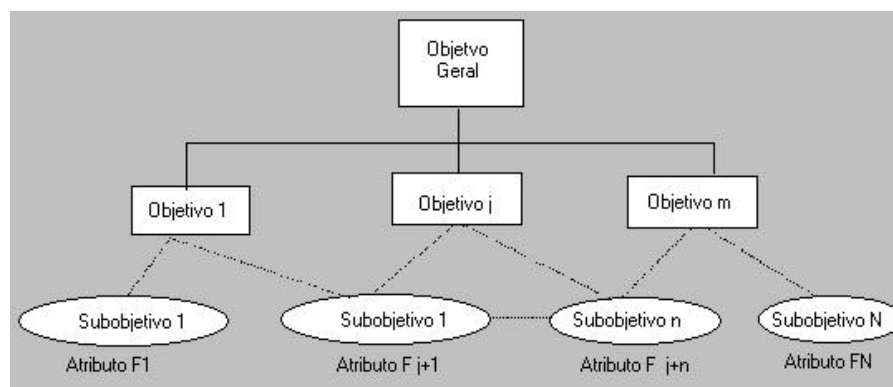
Engloba a Escola Holandesa, que usam conceitos próprios e que, de um modo geral, não possuem nenhuma base axiomática nem fazem uso da maior parte de noções nem da Escola Francesa tampouco da Escola Americana (GOMES, 1998).

As teorias de análise multicritério têm sido alvo de inúmeras pesquisas nas últimas décadas, em nível mundial; conseqüentemente, surgiram várias escolas propondo modelos e métodos mais flexíveis e confiáveis, baseados numa estrutura que permite resolver problemas de decisão com mais de um objetivo, critério ou atributo.

#### 4.2.2. Conceitos Fundamentais

Um dos pontos cruciais da chamada análise multiobjetivo é justamente a definição dos objetivos a serem considerados em uma determinada situação decisória. A literatura é bastante controversa quanto algumas definições sobre objetivos, propósitos, metas. Em geral, um problema multiobjetivo pode ser estruturado segundo (KEENEY & RAIFFA, 1976 apud PORTO et al., 1997) na forma de uma hierarquia.

Considera-se meta uma intenção ou um objetivo muito genérico que pode ser atendido por objetivos mais específicos, que, por sua vez, são quantificados por atributos. Observe a Figura 12.



**Figura 12 - Estrutura hierárquica do processo decisório, segundo KEENEY e RAIFFA (1976).**

*Fonte: PORTO, 1997.*



Para se analisar problemas desta natureza de decisão, é importante conhecer algumas terminologias usadas com frequência durante o processo:

- O analista - refere-se ao cientista ou técnico, que tem como papel fundamental ajudar o decisor no processo. Ele auxilia o decisor a expressar suas preferências, para tirar conclusões definitivas sobre o conjunto de ações (alternativas viáveis);
- O decisor - é empregado para referenciar o indivíduo ou grupo de indivíduos que intervém no processo, influenciando direta ou indiretamente a decisão, através da manifestação das preferências e julgamentos de valor fornecidos em distintas fases do processo;
- O facilitador – é um líder experiente, que deve focalizar a sua atenção na resolução do problema, coordenando os pontos de vista do decisor, mantendo este motivado e destacando o aprendizado no processo de decisão. O seu papel fundamental é esclarecer e modelar o processo de avaliação e ou negociação conducente à tomada de decisão. Deve-se manter neutro durante o processo de decisão, para não influenciar nos julgamentos dos decisores;
- Pesos - de importância relativa dos atributos - se houver independência aditiva nas preferências entre atributos, os trade-offs permitem deduzir pesos de importância relativa. Se, além disso, os trade-offs forem constantes, os pesos também serão constantes;
- Critério - é uma medida base para a efetividade da avaliação, ou seja, permite estabelecer um julgamento de preferência entre as ações; os critérios podem ser metas, alvos ou objetivos almejados;
- Conjunto de critérios - usualmente chamado família de critérios (F), deve ser coerente com a definição do problema e mutuamente exclusivos;
- Atributo - é uma medida que fornece uma base para avaliar os níveis de vários objetivos e definir se as metas têm sido atingidas ou não dada uma decisão particular, ou seja, os atributos funcionam como um aspecto mensurável de julgamento, pelo qual uma variável de decisão pode ser caracterizada;
- Ação - a representação que um decisor constrói para si da solução de um problema;

- Alternativa Dominada (ou Inferior) - uma solução é dominada se existe outra melhor pelo menos em um critério, sem ser pior em nenhum outro;
- Alternativa Eficiente (ou Não-dominada ou Ótima de Pareto) - uma solução é eficiente se não é dominada por nenhuma solução admissível;
- Trade-off - valor de compensação entre dois atributos  $x$  e  $y$  - relação entre o que é preciso perder em  $x$  para ganhar uma unidade em  $y$ , sem sair da curva de indiferença. Definido a partir da tangente à curva, em geral, depende dos valores de  $x$  e  $y$  e também dos valores dos outros atributos;
- Caracterização na forma cardinal - quando é possível estabelecer-se uma escala numérica de comparação;
- Caracterização na forma ordinal - no caso em que é possível somente a ordenação, sem a possibilidade de haver uma comparação numérica.

### 4.3. DOMINÂNCIA E O CONJUNTO PARETO ÓTIMO

O problema de se comparar duas soluções diferentes pode ser resolvido parcialmente através do conceito de dominância. Segundo este conceito, define-se que uma solução  $v$  domina outra solução  $u$  se somente para nenhum objetivo a solução  $v$  possui uma avaliação pior do que a avaliação em  $u$ . Além disso, para, pelo menos, um objetivo, a solução  $v$  deve apresentar uma avaliação melhor do que a de  $u$ .

Obviamente, tem-se, em particular uma solução  $v$  que domina uma solução  $u$  quando ela apresenta avaliações superiores para todos os objetivos. Além disso, caso uma solução não seja dominada por nenhuma outra, diz-se então que ela faz parte do chamado conjunto Pareto Ótimo.

Na literatura, é possível encontrar uma variedade de metodologias de otimização, que procuram encontrar o conjunto Pareto Ótimo.

#### 4.4. AGREGAÇÃO DE OBJETIVOS

A agregação de objetivos em problemas multicritério motivou, no âmbito da Teoria Clássica da Decisão, a utilização de funções de valor, capazes de induzir uma ordem total nas alternativas (GOMES, 1998).

A estratégia de agregação de objetivos corresponde ao método mais simples e direto para a combinação de múltiplas medidas de desempenho, consistindo simplesmente numa média ponderada relacionada a cada objetivo. Assim, a avaliação  $F$  de uma determinada solução será dada por:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (12)$$

Onde:

$f_i$  representa a avaliação da solução em relação a um determinado objetivo  $i$ , e  $w_i$  corresponde ao respectivo peso, para um total de  $n$  objetivos.

Este método possui a vantagem de ser bastante fácil de se implementar, além de muito eficiente do ponto de vista computacional. Entretanto, ele apresenta alguns problemas, como a dificuldade de se determinar quais os pesos  $w_i$  mais adequados para um dado problema em particular.

Na realidade, para certos problemas, diferentes objetivos podem ser considerados como sendo de mesma importância, e, portanto, nesta situação torna-se natural a escolha de pesos  $w_i$  iguais; na maioria dos casos, a otimização de um determinado objetivo pode ser mais importante do que a de outro, ou, ainda, ser mais complicada a definição de qual objetivo possui maior prioridade (GOMES, 1998).

#### 4.5. A FUNÇÃO MULTICRITÉRIO DE DECISÃO

A decisão multicritério ocorre quando se tem um conjunto  $K$  de alternativas ou ações, submetidas à avaliação. Em uma família de critérios, pretende-se:

1. determinar um conjunto de ações ou alternativas, conjunto K, que sejam consideradas as melhores para resolver um certo problema;
2. dividir o conjunto K em subconjuntos;
3. ordenar as alternativas em ordem crescente ou decrescente, considerando solucionar o problema.

A idéia central, a qual preserva a metodologia multicritério à decisão, é a de haver sempre a presença da subjetividade no processo decisório, sendo esta individual ou grupal. A filosofia dos métodos de apoio à decisão vão mais além, quando afirmam que é impossível prever se uma situação é boa ou má, analisando apenas métodos matemáticos. Precisa existir o fator humano, nunca poderá ser uma situação onde as decisões sejam geradas somente através de algoritmos.

#### **4.6. AS PREFERÊNCIAS DOS DECISORES**

A presença humana nas decisões é de fundamental importância. Através disso, os métodos multicritérios propõem a relação, levando em conta a opinião do decisor, que, a partir de seus conhecimentos sobre o problema, conduzem ao caminho mais adequado de ação. Para identificar o sistema de preferências dos decisores, antes, é necessário:

1. considerar a subjetividade dos atores de decisão, as percepções individuais e vislumbrar em quais aspectos dos problemas os decisores encontram maior dificuldade de explicitar as suas percepções individuais;
2. estruturar o problema de acordo com a visão compartilhada;
3. identificar os pontos de vista comuns;
4. saber onde os decisores são inconsistentes;
5. verificar o que pode ser mudado e por qual motivo.

As preferências dos decisores são cruciais para a estruturação e modelação do problema de decisão multicritério.

#### **4.7. ESTRUTURAÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA**

Os participantes do processo de decisão que julgarem conveniente usar da metodologia multicritério para auxílio na estruturação dos seus problemas e, posteriormente, priorizar ou escolher as alternativas factíveis, devem primeiramente:

1. definir e estruturar o problema;
2. definir o conjunto de critérios e/ou atributos que serão utilizados para classificar as alternativas;
3. escolher se utilizará métodos discretos ou contínuos; se optar por métodos discretos (concebidos para trabalhar-se com um número finito de alternativas), deverá privilegiar o uso de métodos da Escola Francesa ou da Escola Americana;
4. identificar o sistema de preferências dos decisores;
5. escolher o procedimento de agregação.

Na fase de modelagem de um problema, utilizando como apoio os métodos multicritério é importante levar em consideração:

- a) a escolha das alternativas;
- b) a construção dos critérios e agregação das informações;
- c) a classificação das alternativas onde se identifique a dominância dos grupos;
- d) a ordenação de uma hierarquia de classificação entre as alternativas.

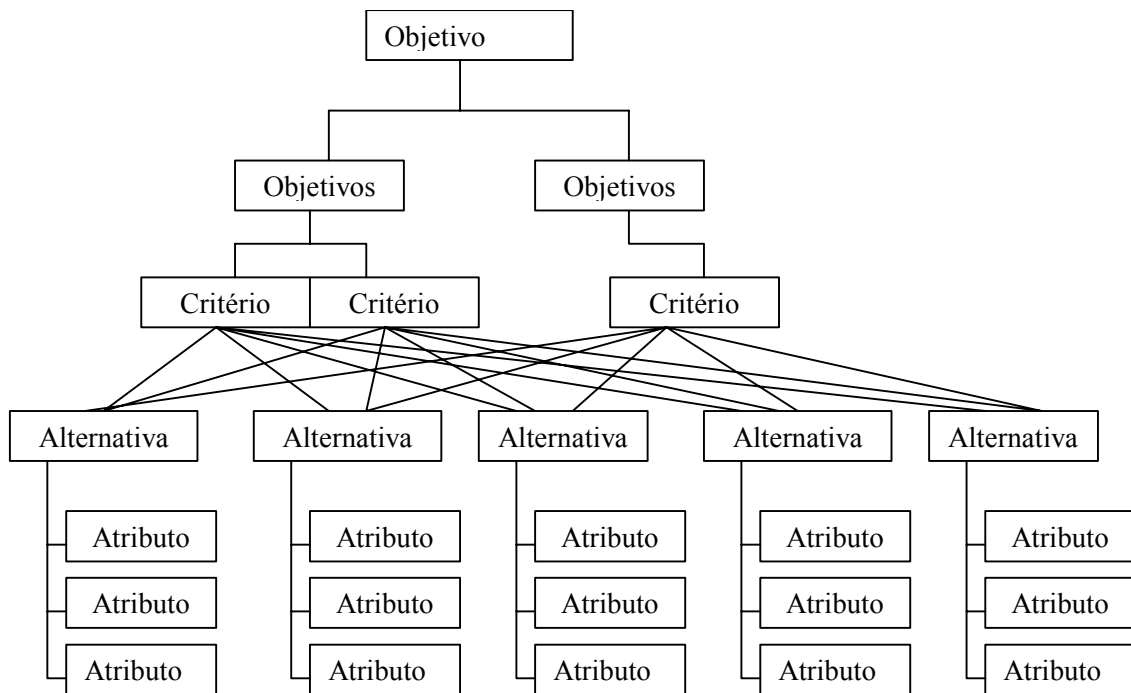
A fase de estruturação de um problema pode ser dividida em três partes:

- a) a estrutura e composição dos componentes;
- b) a análise;
- c) a sintetização das informações.

No primeiro passo, quando busca identificar as alternativas, especificar os objetivos, critérios e atributos, (RAIFFA, 1968 & KIRKWOOD, 1997 apud RUDOLPHI, 2000) criaram

a árvore da decisão, que facilita a visualização e compreensão dos componentes essenciais deste estágio.

A árvore de decisão é genérica para todos os métodos abordados na modelagem multicritério, embora se diferenciem em alguns aspectos, como, por exemplo, o nível de detalhamento do problema, as técnicas empregadas, os métodos de agregação. A Figura 13, exibe a árvore de decisão.



**Figura 13 - A genérica árvore da decisão.**

*Fonte: RUDOLPHI, 2000.*

#### **4.8. METODOLOGIA MULTICRITÉRIO DE NEGOCIAÇÃO E DECISÃO EM GRUPO**

O avanço tecnológico, a globalização e a conseqüente evolução, faz com que as decisões sejam tomadas o mais rápido possível; simultaneamente, deve-se cuidar para que estas não percam sua qualidade e não alterem os resultados esperados, com o propósito de auxiliar para que esses objetivos sejam cumpridos, melhorando cada vez mais a qualidade das decisões; torna-se crescente o número de participantes envolvidos nos processos de tomada de decisão.

As vantagens da tomada de decisão em grupo são muitas, pois um grupo pode reunir mais conhecimento do problema do que qualquer um dos seus membros isoladamente. Facilita a detecção de erros nas alternativas, além de tornar os elementos do grupo mais interativos e solidários com as decisões nas quais tomaram parte. Porém, a tomada de decisão por mais de um decisor gera mais custo e dificuldades na negociação das alternativas, uma vez que os participantes podem divergir na avaliação.

A abordagem multicritério de negociação e decisão em grupo ocupa um papel muito importante, na tentativa de tirar partido dessas vantagens, minimizando as desvantagens do processo decisório; para isso, tem sido desenvolvido uma série de métodos para apoiar e conduzir os decisores na avaliação e escolha das alternativas-solução.

A quantificação das soluções, sua ordenação ou a geração de novo conjunto de possíveis soluções, é tarefa dos métodos multicritério. Eles podem ser empregados a qualquer momento, imediatamente à construção dos critérios, na reformulação dos objetivos, ou na flexibilização das preferências e análise das conseqüências.

Um ponto crítico da decisão em grupo é a questão das preferências individuais quanto às alternativas que devem ser trabalhadas de maneira que possam ser combinadas, resultando numa decisão em conjunto. A decisão em grupo é, assim, uma conseqüência de um intercâmbio de pontos de vista diferentes e de propostas aceitáveis, do qual emana a negociação das alternativas-solução. É através dos métodos de apoio multiobjetivo que os tomadores de decisão buscam a melhor alternativa para o problema.

Na negociação, podem existir tantas alternativas quantas forem as partes envolvidas no processo. As alternativas são interdependentes a idéia da negociação é dar ênfase à arte da escolha de alternativas em diferentes espaços de decisão; é a convergência das partes para o acordo.

Na tomada de decisão em grupo, a negociação pode ser feita através dos seguintes modelos. Modelo econômico de barganha, modelos baseados na teoria dos jogos. Ambos utilizam a teoria da utilidade; também podem auxiliar nesse processo os modelos de agregação, os modelos táticos e os modelos comportamentais.

O apoio multicritério à decisão, com seus vários métodos analíticos, constitui-se em uma nova e dinâmica área de pesquisa para suporte à decisão, especialmente às decisões grupais e à negociação em particular.

#### **4.9. MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE DECISÃO**

Os métodos multicritério têm sido desenvolvidos para apoiar e conduzir os decisores na avaliação e escolha das alternativas ou solução, bem como auxiliar a compreender e explicitar suas preferências junto às mesmas. São indicados para problemas onde existam vários critérios de avaliação, normalmente conflitantes.

A busca da solução de um problema freqüentemente ocorre em ambiente onde os critérios são diversificados, e o ganho de um critério poderá causar uma perda em outro. Então nos restará escolher a solução final, levando-se em conta o compromisso das diversas relações de troca, intermediárias aos procedimentos adotados.

Os métodos multicritério são puras ferramentas de apoio à decisão e agregação de valor à informação; eles servem essencialmente para quantificar as soluções segundo os critérios definidos e escalonados e para priorizar as soluções em ordem crescente de valor, ou gerar um novo subconjunto de soluções alternativas, através das preferências e conseqüências dos decisores.

A metodologia multicritério tem-se baseado em operacionalidade e em julgamentos pessoais. Suas vantagens são:

- a) uso fácil por não especialistas, preferencialmente transformada em um programa de computador que seja o mais amigável possível com o usuário, dispondo de recursos gráfico-visuais;
- b) constituiu-se em um método lógico e transparente;
- c) provê liberdade de ambigüidade para interpretações dos dados de entrada;
- d) engloba tanto critérios quantitativos como qualitativos;
- e) os julgamentos de valor podem ser exercidos em escalas cardinais, verbais ou visuais;



f) permite ao decisor dispor de algoritmos que permitam a utilização de critérios independentes uns dos outros, como algoritmos que auxiliem em problemas onde os critérios de avaliação são interdependentes, bem como, analogamente, pode lidar com alternativas independentes umas das outras;

g) incorpora questões do comportamento humano nos processos de decisão.

Dependendo da forma como são apresentadas as preferências do decisor e da natureza do problema, os métodos de análise multiobjetivo, (PORTO et al., 1997) podem ser divididos nas seguintes técnicas:

#### **4.9.1. Técnicas que Geram o Conjunto das Soluções não Dominadas**

Estas técnicas consideram um vetor de funções objetivo, e, mediante tal vetor, geram o conjunto das soluções não dominadas. Aqui não se consideram as preferências do decisor, tratando apenas com as restrições físicas do problema. São exemplos destas técnicas.

- método das ponderações;
- método das restrições;
- método multiobjetivo linear.

#### **4.9.2. Técnicas que Utilizam uma Articulação Antecipada das Preferências**

Para obter a ordenação das soluções não dominadas, essas técnicas solicitam, ante a resolução do problema, o parecer do decisor a respeito das trocas possíveis entre objetos e os valores referentes a eles. As variáveis aplicadas podem ser contínuas ou discretas. Vejamos.

- método Electre;
- método Promethee;
- método do valor substituto da troca;
- método da matriz de prioridades.

### 4.9.3. Técnicas que Utilizam uma Articulação Progressiva das Preferências

A principal característica desse grupo de técnicas, é que, assim que uma solução é encontrada, pergunta-se ao decisor se o nível atingido de atendimento aos objetivos é satisfatório, caso a resposta seja negativa, o problema é modificado e resolvido novamente. Como exemplos, temos:

- método de passo;
- método da programação de compromisso.

Contudo, esses métodos mostram que o problema da decisão é determinado pelo número de alternativas definidas *a priori*, relacionadas a um conjunto de atributos sob os quais são feitos julgamentos segundo as preferências dos decisores. Esses julgamentos são formados a partir de uma função que agregue valores aos atributos considerados, sendo a alternativa preferida a que receber o maior valor.

Assim, usando diversas formas de agregação de valores, foi formulado um conjunto de métodos de análise multicritério, para auxiliar na resolução de problemas complexos de decisão. Entre os métodos mais conhecidos e aplicados estão os métodos da “família” ELECTRE e PROMETTEE.

Diante do contexto, conclui-se que uma boa metodologia não explora somente as soluções do problema; mas também, o decisor, na medida em que o auxilia na busca da decisão, quando este deve expor suas idéias, contestações e preferências.

Os métodos e técnicas multicritério não são exaustivos, entretanto, não é interessante esclarecê-los, pois, a pesquisa baseia-se apenas no método *fuzzy*, compreendendo também a sua forma modificada.

## 4.10. FUNÇÕES DE AGREGAÇÃO

Segundo (SMOLÍKOVÁ, 2002) uma tomada de decisão multicritério compreende dois passos:

- 1 - a agregação dos julgamentos, considerando cada critério e cada alternativa;

2 - a ordem das alternativas de acordo com as regras da função de agregação.

A agregação de valores de critérios é um processo muito usado em metodologias de tomadas de decisão. Os valores agregados são as preferências ou graus de satisfação do critério.

A função de agregação é um modelo matemático, através do qual, todos os valores estimados aos critérios serão combinados. A função mede a proximidade de um valor particular do critério em relação a seu melhor valor possível, estabelecendo ao decisor as seguintes questões:

- a) Pede-se ao decisor que forneça uma classificação dos critérios em ordem de importância;
- b) Considera-se dois critérios de cada vez, pede-se ao decisor que aponte pesos relativos a cada atributo;

As propriedades das funções de agregação podem ser adotadas a partir da natureza do problema, podendo ser simétricas, crescentes, aditivas, mínimas, máximas, entre outras. Vejamos algumas delas:

#### 4.10.1. Média Ponderada

Dentre as funções de agregação multicritério, a Média Ponderada é a forma mais comum e, na maioria dos casos, a mais aplicada (MARICHAL, 2002).

A função vai calcular valores sujeitos à ponderação ou à frequência de ocorrência, é determinada pela seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad \omega = (\omega_1, \dots, \omega_n) \in [0,1]^n \quad (13)$$

$(\omega_i)$  coeficiente de ponderação

(i) cada um dos critérios

(n) número máximo de critérios

#### 4.10.2. Ordered Weighted Averaging - OWA

A função de agregação *OWA*, segundo (YAGER, 1999) aplica-se em muitos campos. Os operadores *OWA* combinam as informações através dos valores dos pesos, relacionando-os em uma ordem crescente de posição.

Para qualquer vetor  $w$  ponderado

$$W=(w_1,...,w_n) \in [0,1]^n$$

$$\text{Tal que } w \in [0,1]^n, \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

A função *OWA* associada a  $w$  é definida por

$$owa_w(x) = \sum_{i=1}^n w_i x_{(i)} \quad (14)$$

Uma característica da função de agregação *OWA* é a capacidade de ordenação dos pesos, por exemplo, um peso ( $w_i$ ) não estará associado a um escore ( $x_i$ ), mas, sim associado à posição do escore na ordenação crescente dos pesos.

#### 4.10.3. Integral Choquet

Tem por função agregar critérios, combinando os escores com suas respectivas medidas *fuzzy* (SMOLÍKOVÁ, 2002).

Muito indicada para problemas de avaliação multicritério, quando este é composto por critérios de natureza quantitativa.

A Integral *Choquet* pode ser definida como:

$X, \Omega, g$  representam o universo das medidas *fuzzy*, com  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ .

Seja  $h: \rightarrow [0,1]$  uma função mensurável.

Assumindo  $0 \leq h(x_1) \leq \dots \leq h(x_n) \leq 1$  e

$A_i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_N\}$ , sendo  $A$  o conjunto de critérios:

A Integral *Choquet* de  $h$  com suas respectivas medidas *fuzzy* em  $g$  é definida da seguinte forma:

$$\int_c h \circ g = \sum_{i=1}^N [h(x_i) - h(x_{i-1})] g(A_i) \quad (15)$$

#### 4.10.4. Integral Sugeno

A Integral Sugeno, também é conhecida como Integral *Fuzzy*, é uma função de agregação que fornece a avaliação sintética das possíveis soluções de um problema multicritério.

Sua maneira de agregar valores é oposta ao da Média Ponderada, sendo viável sua aplicação quando a natureza do problema for composto por critérios, que não oferecem métricas objetivas de julgamento.

$i$  = ponderação de  $N$  tal que,  $x_{(i)} \leq \dots \leq x_{(n)}$

$\wedge$  = operador mínimo

$\vee$  = operador máximo

$A_{(i)} = \{(i), \dots, (n)\}$

A Integral Sugeno de  $x: N \rightarrow [0, 1]$ , pode ser representada pela equação:

$$S_v(x) := \bigvee_{i=1}^n [x_{(i)} \wedge v(A_{(i)})] \quad (16)$$

Assumindo que os coeficientes determinados para cada critério ( $x_i$ ) é fixado pela ponderação dos mesmos, tem-se o seguinte resultado:

$$S_v(x_1, x_2, x_3) = [x_3 \wedge v(3, 2, 1)] \vee [x_1 \wedge v(1, 2)] \vee [x_2 \wedge v(2)] \quad (17)$$

#### 4.10.5. Operadores (Máximo e Mínimo)

Segundo (DUBOIS, 1986 apud MARICHAL, 2002) os operadores *max* e *min* e suas respectivas funções de agregação *wmax* e *wmin* são análogos à média ponderada e são representados da seguinte forma:

Para qualquer peso ( $\omega$ ) tal que  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \in [0,1]^n$  tem-se:

$$\bigvee_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (18)$$

A função  $wmax(\omega)$  associada com um peso ( $\omega$ ) é definida por:

$$wmax_{\omega}(x) = \bigvee_{i=1}^n (\omega_i \wedge x_i), x \in [0,1]^n \quad (19)$$

Para qualquer peso ( $\omega$ ) tal que tal que  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \in [0,1]^n$  tem-se:

$$\bigwedge_{i=1}^n \omega_i = 0 \quad (20)$$

A função  $wmin(\omega)$  associada com um peso ( $\omega$ ) é definida por:

$$wmin_{\omega}(x) = \bigwedge_{i=1}^n (\omega_i \vee x_i), x \in [0,1]^n \quad (21)$$

Qualquer função  $wmax(\omega)$  é uma função  $\mathcal{W}_c^{\vee \wedge}$  na qual a fórmula é definida por

$$\begin{cases} c_i = \omega_i, \forall i \in N \\ c_T = 0, \forall T \subseteq N \end{cases} \quad \text{tal que } |T| \neq 1$$

e completada por:

$$c_T = \bigvee_{i \in T} \omega_i, \forall T \subseteq N \quad (22)$$

Neste caso,  $c$  é um incremento, que representa uma possibilidade de medida  $\pi$ , que é caracterizada da seguinte propriedade:

$$\pi(S \cup T) = \pi(S) \vee \pi(T), \quad \forall S, T \subseteq N \quad (23)$$

Da mesma forma, para qualquer função,  $wmin(\omega)$  é uma função,  $\mathcal{W}_c^{\vee \wedge}$  e pode ser definida por:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = \omega_i, \forall i \in N \\ c_T = 1, \forall T \subseteq N \end{array} \right. \quad \text{Tal que } |T| \neq 1$$

e completada pela fórmula:

$$d_T = \bigwedge_{i \in T} \omega_i, \forall T \subseteq N \quad (24)$$

Ao contrário de  $wmax$ ,  $d$  decresce, então se uma função  $c'$ , definida

por  $c'_T = d_{N \setminus T}$  para todo  $T \subseteq N$ , representa a *medida*  $N$ , a qual é caracterizada pela seguinte propriedade:

$$N(S \cap T) = N(S) \wedge N(T), \quad \forall S, T \subseteq N \quad (25)$$

#### 4.11. INTEGRAL FUZZY – APLICAÇÃO EM PROBLEMAS MULTICRITÉRIO

Um exemplo do uso do método *fuzzy* para tratamento multicritério na compra de um equipamento doméstico, é mostrado de acordo com (BORGES, 1996). Neste caso a meta de comprar o melhor equipamento segundo o usuário será atendida através de quatro critérios distintos: preço, configuração da máquina, modelo e marca de fabricação. Os critérios serão representados conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Critérios usados no exemplo

Critérios	
Preço	(P)
Modelo	(M)
Configuração	(C)
Fabricante	(F)

### - Integral *Fuzzy*

Este é um método da categoria de agregação de múltiplos objetivos. O método produz uma avaliação sintética sobre múltiplos critérios, onde se faz necessária a definição das preferências do decisor.

O conjunto de critérios finitos  $V$ , dados por  $V = \{P, M, C, F\}$ , são ponderados através de um valor de importância  $g(\{ \})$  e são “independentes” entre si. Neste caso, o problema é ponderar os critérios em conjunto. Dentro desta restrição pode-se construir uma função de agregação,  $g(E)$ , com as seguintes propriedades.

$$g(E) = \max(v_1, v_2) + (1 - \max(v_1, v_2)) \times \max(0.05; \min(v_1, v_2)) \quad (26)$$

1.  $g(\emptyset) = 0$
2.  $g(V) = 1$
3.  $E \subset F \subset V$  implica que  $g(E) \leq g(F)$ .

Onde,  $E$  e  $F$  representam o subconjunto de critérios;

A Integral *Fuzzy* considera outro fator (uma nota) que seja fixada pelo decisor, representando o grau de preferência dos critérios segundo o seu julgamento, essa nota é determinada por  $h(V)$ . A partir da formulação das importâncias e das notas, a função multicritério é concebida conforme a equação abaixo.

$$\int h \partial g = \max [ \min(\min( h(v_i) ), g(E_i) ) ] \quad (27)$$

Onde,  $E \subset V$  e  $v \in E$



#### 4.11.1. Exemplo de Aplicação da Integral Fuzzy

O esquema proposto como exemplo consiste em utilizar o método Integral *Fuzzy* para posteriormente está comparando-o à sua forma modificada.

Os critérios são avaliados através de uma escala subjetiva no intervalo entre 0 e 1; zero está associado à nenhuma importância; 1 está associado a melhor importância; os demais valores indicam importâncias relativas.

As considerações anteriores são aplicadas nos valores de importância dos critérios escolhidos na Tabela 5 e ponderados por  $g(E)$ , conforme a Tabela 6.

**Tabela 5 - Valores de importância dos critérios**

Critérios	Importância
P	$g(\{P\}) = 0,3$
M	$g(\{M\}) = 0,2$
C	$g(\{C\}) = 0,4$
F	$g(\{F\}) = 0,6$

**Tabela 6 - Valores de importância dos subconjuntos de critérios segundo  $g(E)$**

Sub-conjunto de critérios	$g(E)$
$g(\{P,M,C,F\})$	1
$g(\{P,M,C\})$	0,664
$g(\{P,M,F\})$	0,776
$g(\{P,C,F\})$	0,832
$g(\{M,C,F\})$	0,808
$g(\{P,M\})$	0,44
$g(\{P,C\})$	0,58
$g(\{P,F\})$	0,72
$g(\{M,C\})$	0,45
$g(\{M,F\})$	0,68
$g(\{C,F\})$	0,76

Foram considerados os valores dos escores para o exemplo da compra do equipamento conforme indicado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Valores considerados aos escores para o exemplo**

Critérios	Escore
P	$h(F) = 0,3$
M	$h(M) = 0,5$
C	$h(C) = 0,7$
F	$h(P) = 0,8$

De posse dos dados ponderados, o próximo passo é ordenar os valores dos escores de forma que obedeçam os critérios de relacionamento conforme o exemplo abaixo:

$$h(F)=0,3 = \min h(v_i)$$

De acordo com (BORGES, 1996), o operador  $\min$  sob  $h(v_i)$  segue o parâmetro  $\alpha$ , onde  $E_\alpha$  é subconjunto de  $V$ , com  $\alpha \in [0,1]$ , tal que,  $E_\alpha = \{v | h(v_i) \geq \alpha\}$ .  $E_\alpha$  é o conjunto de valores de importância, cujos escores são maiores ou iguais ao  $\min h(v_i)$ , correspondentes ao conjunto dos critérios,  $\{V\}$ . Então,  $g(E_{\alpha=0,4}) = g(V) = 1$ .

Os demais valores são calculados nessa mesma ordem:

$$g(E_{\alpha=0,5}) = \{V\} - \{F\} = \{M, C, P\} \mid g(E_{\alpha=0,5}) = g(\{M, C, P\}) = 0,664$$

$$g(E_{\alpha=0,7}) = \{V\} - \{F\} - \{M\} = \{C, P\} \mid g(E_{\alpha=0,7}) = g(\{C, P\}) = 0,58$$

$$g(E_{\alpha=0,8}) = \{V\} - \{F\} - \{M\} - \{C\} = \{P\} \mid g(E_{\alpha=0,8}) = g(\{P\}) = 0,3$$

Com estas definições, igualando-se os termos, tem-se:

$$\int_F h \hat{d}g = \max [\min[h(F), g(V)], \min[h(M), g(C, M, P)], \min[h(C), g(C, P)], \min[h(P), g(P)]]$$

$$\int_F h \hat{d}g = \max [\min(0,3, 1), \min(0,5, 0,664), \min(0,7, 0,58), \min(0,8, 0,3)]$$

$$\int_F h \hat{d}g = 0,58$$

0,58 representa a avaliação sintética do resultado da aplicação da Integral.

#### 4.11.2. Desvantagem do Método

Uma desvantagem na aplicação do método da Integral *Fuzzy* decorre do fato de basear-se apenas nos operadores máximo e mínimo, que não capturam certas faixas de valores, determinados aos escores, nesse sentido a sua aplicação se torna inviável. Os dados da Tabela 8, depois de submetidos ao processo anterior, obteve o mesmo valor (0,58) nas situações 1 e 2, quando as notas dos critérios variaram.

**Tabela 8 - Valores diferentes atribuídos aos escores**

	Situação 1	Situação 2
	$h(F)=0,49$	$h(F)=0,3$
	$h(M)=0,57$	$h(M)=0,5$
	$h(C)=0,70$	$h(C)=0,58$
	$h(P)=0,80$	$h(P)=0,59$
Avaliação Sintética	0,58	0,58

Assim, o método definiu um mesmo valor final para situações distintas, os escores da situação 1 são maiores que os escores atribuídos na situação 2, não havendo variação nos resultados. Tal problema pode ser reparado empregando a forma modificada, na qual se trabalha as funções de “incremento” e “decremento”.

#### 4.11.3. Exemplo de Aplicação da Integral Fuzzy Modificada

Conforme se vê, chegou-se a uma solução. Obtida a avaliação sintética no método original, pode-se passar à segunda fase, na qual se trabalha com a Integral *Fuzzy* modificada. Nesta etapa do processo, os escores, de valores menores que o valor da avaliação sintética obtido na primeira fase, correspondem-se os decrementos, e os de valores maiores, os incrementos.

Adicionando as variáveis incremento e decremento, o método modificado tem a seguinte forma:

$$\int_{Fm} h \partial g = \int_F h \partial g + \Delta^+ + \Delta^- \quad (28)$$

Para este novo sistema, compreendem os seguintes passos:

01. Designar de valor governante (vg), o resultado obtido na primeira fase, gerar os incrementos e os decrementos:

- (a)  $Vg = 0,58$
- (b) Decrementos =  $h(F)$ ,  $h(M)$
- (c) Incrementos =  $h(C)$ ,  $h(P)$

02. Calcular a variação relevante (vr). Quando obtém-se decrementos, a vr é dada pela menor diferença entre o vg e os valores maiores que ele dentre os seguintes três valores:

- (a) vg
- (b) o valor mais próximo dos escores vizinhos, segundo uma ordem crescente de valores
- (c) o valor do subconjunto de critérios (importância) que está associada ao escore correspondente

Caso contrário, vr se dá pela menor diferença entre vg e os valores menores que ele dentre os valores (a), (b) e (c) citados em 02.

03. Depois de calculada vr, multiplica-se o seu valor pela importância  $g(E)$  correspondente a cada escore.

Usando a idéia anterior, pode-se representar a formulação da vr do decremento  $h(f)$  conforme indicado abaixo.

$$(a) 0,58$$

$$(b) h(M) = 0,5$$

$$(c) g(V) = 1 = \text{valor da importância associado à } h(F) = 0,3$$

Os valores oriundos de (a), (b) e (c) são maiores que o escore  $h(F)$ , ocasionando menor diferença em (b), fazendo-se a vr corresponder ao valor  $-0,2$ , obtém-se o decremento  $h(F)$  em:

$$\Delta^-(F) = g(F) \times vr = -0,12$$

Tal procedimento para os demais escores pode ser encontrado na Tabela 9

**Tabela 9 - Resultados dos escores de incrementos e decrementos**

Escore	Tipo	VR	$\Delta^+/\Delta^-$
$h(F)=0,3$	DEC	-0,2	-0,12
$h(M)=0,5$	DEC	-0,08	-0,016
$h(C)=0,7$	INC	0,12	0,048
$h(P)=0,8$	INC	0,10	0,24

Uma vez que os valores de incrementos e decrementos foram estabelecidos, a formulação da avaliação sintética no método modificado é dado por:

$$vg + \Delta^-(F) + \Delta^-(M) + \Delta^+(C) + \Delta^+(P) = 0,73$$

Na Tabela 10, as situações 1 e 2 podem agora ser avaliadas através dos resultados obtido com a aplicação da Integral *Fuzzy* modificada.

**Tabela 10 - Resultados comparativos da IF original e modificada**

	Situação 1	Situação 2
	$h(F)=0,49$	$h(F)=0,3$
	$h(M)=0,57$	$h(M)=0,5$
	$h(C)=0,70$	$h(C)=0,58$
	$h(P)=0,80$	$h(P)=0,59$
Método original	0,58	0,58
Método modificado	0,66	0,39

## 5. ESTUDO DE CASO

Para a comparação das metodologias de agregação das Integrais *Fuzzy* e análise multicritério, tomou-se como área de estudo o rio Cuiabá, perímetro urbano, o qual encerra índices de poluição associados à análise multicritério.

### 5.1. RIO CUIABÁ / PERÍMETRO URBANO

O Estado de Mato Grosso, situado na região Centro-Oeste do Brasil, possui uma grande disponibilidade hídrica, uma vez que abriga as principais nascentes de três grandes bacias hidrográficas brasileiras: Amazônica, Araguaia/Tocantins e Platina. A bacia Platina tem como principal corpo d'água o rio Paraguai, do qual o rio Cuiabá é um dos afluentes principais (TABACZENSKI, 2000). A Figura 14, ilustra a bacia do rio Cuiabá subdividida em suas cinco principais sub-bacias (CAVINATTO et al., 1995) e destaca o trecho urbano do rio Cuiabá (Cuiabá pela margem esquerda e Várzea Grande pela margem direita), área de implementação deste trabalho.

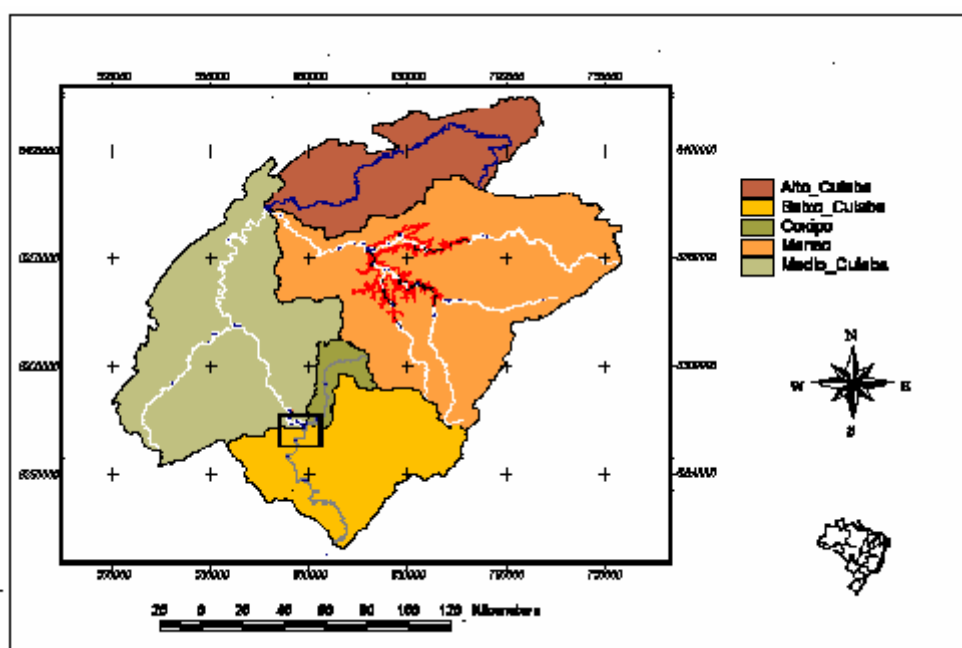


Figura 14 - Bacia do rio Cuiabá e suas sub-bacias.

Fonte: SIBAC, 2000.

O trecho do médio Cuiabá percorre, aproximadamente, 150 km, onde chega a 135m de altitude, sendo considerado neste trecho um rio de planície devido à baixa declividade. É neste trecho que ocorre uma intensificação dos impactos ambientais sobre o rio, correspondente ao trecho urbano das cidades de Cuiabá e Várzea Grande, denominado de Baixada Cuiabana. O clima predominante é do tipo quente tropical semi-úmido, com temperatura média anual de 26°C, com as máximas médias diárias em torno de 36°C, em setembro, e as mínimas de 15°C, em julho. A temperatura é mais elevada de setembro a novembro (MUSIS, 1996).

A precipitação média anual chega a valores de 1.342 mm/ano (INMET, 2000). A bacia apresenta uma sazonalidade marcada por dois períodos bem distintos, definidos pela precipitação: seca (maio a outubro) e chuva (novembro a abril). A vazão do rio Cuiabá é diretamente influenciada pela sazonalidade.

O rio Cuiabá e seus principais tributários respondem por 69,3% do total da água destinada ao abastecimento público na bacia (TEIXEIRA, 1997) e atende um percentual de 95% e 82% do abastecimento das cidades de Cuiabá e Várzea Grande, respectivamente. Tem sido também largamente utilizado para a diluição dos efluentes domésticos gerados nas sub-bacias urbanas, principalmente nas que apresentam maiores concentrações populacionais. Nelas são diretamente lançados esgotos domésticos, resíduos sólidos *in natura*, além da parcela proveniente dos efluentes industriais. Em (TEIXEIRA, 1994), as cidades de Cuiabá e Várzea Grande são responsáveis por 94% de toda a poluição orgânica de origem doméstica que chega, direta ou indiretamente ao rio Cuiabá.

Em estudo qualitativo do rio Cuiabá e de suas principais sub-bacias no perímetro urbano, (LIMA & RONDON LIMA, 1995) citam que a população abastecida de Cuiabá e as indústrias implantadas no município geram altas cargas orgânicas poluidoras. Os autores estimaram que cerca de 70% da poluição orgânica lançada no rio Cuiabá seja proveniente de esgoto doméstico e que 50% do esgoto produzido na bacia sejam lançados em fossas sépticas e sumidouros e o restante chegue até o rio Cuiabá através dos córregos.

Esses córregos apresentaram características similares a um esgoto de fraca concentração. Além das fontes pontuais, oriundas dos despejos domésticos e industriais, possui também contribuição significativa das fontes difusas nas áreas com menor taxa de urbanização, caracterizada por uma ocupação onde predominam pequenas chácaras e lotes

maiores, onde exercem atividades ligadas à suinocultura, à avicultura, à bovinocultura e à horticultura.

## **5.2. CRITÉRIOS UTILIZADOS NO MODELO**

Vários estudos realizados na bacia do rio Cuiabá (GOMES, 1984, FEMA, 1997, LIMA, 2001, LIMA, 2002, LIBOS, 2002, NEVES, 2002, ZEILHOFER, 2002) dentre outros mostraram que existem alguns fatores que influenciam mais fortemente na qualidade das águas superficiais deste rio; são eles: os efluentes domésticos e industriais, a sazonalidade e a poluição oriunda de fonte difusa.

Com isso, esses fatores formaram o escopo dos critérios utilizados para a implementação das Integrais *Fuzzy* proposta neste estudo. Adotou-se um peso para cada critério baseado nos estudos e entrevistas com especialistas da área. Foram identificados pontos do rio onde o índice de poluição é maior, segundo as características, a saber:

- onde há poluição por efluentes domésticos e efluentes industriais;
- onde há poluição oriunda de fontes pontuais (pontos de despejo de esgoto) e fontes difusas.

De posse dos valores de importância e das informações de diagnóstico, a próxima fase foi construir o método para calcular as integrais, o qual permitiu sua manipulação e entendimento, que servirá de base à aprendizagem e à investigação.

## **5.3. MODELO PROSPECTIVO USANDO AS INTEGRAIS FUZZY**

Neste modelo, ficou definido que os critérios serão ponderados segundo o conhecimento de especialistas na área de recursos hídricos. O procedimento é atribuir pesos aos critérios conforme o exemplo no capítulo 4. Segundo (VEIGA & MEECH, 1994) no processo de aplicação das técnicas de agregação, a definição heurística de pesos continua sendo amplamente aceita em situações onde a teoria e os modelos empíricos de comportamento dos dados não se encontram bem esclarecidos.



Adotou-se as denominações Ed, Ei, Sz e Pd para referenciar os respectivos critérios: efluente doméstico, efluente industrial, sazonalidade e poluição por fonte difusa.

Na Tabela 11, são mostrados os critérios e os níveis de importância estabelecidos para cada um deles, segundo a sua influência no meio. Os valores de agregação dos subconjuntos de critérios são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 11 – Importância dos critérios usados na avaliação do rio**

Critério	Importância
Ed	0,9
Ei	0,3
Sz	0,8
Pd	0,7

**Tabela 12 - Esquema de determinação do grau de importância para o conjunto de critérios**

Importâncias combinadas	$g(E)$
$g(\{V\})$	1
$g(\{Ed, Ei\})$	0,93
$g(\{Ed, Sz\})$	0,98
$g(\{Ed, Pd\})$	0,97
$g(\{Ed, Ei, Sz\})$	0,986
$g(\{Ed, Sz, Pd\})$	0,994
$g(\{Ed, Ei, Pd\})$	0,979
$g(\{Ei, Sz\})$	0,86
$g(\{Ei, Pd\})$	0,79
$g(\{Sz, Pd\})$	0,94

Após a definição de valores de importância, devem ser introduzidos os escores e, em seguida pode-se passar à formulação do problema na forma da Integral original e modificada, conforme descrito nos itens abaixo.

1.  $h(Ed) = 0,10$ ;  $h(Sz) = 0,14$ ;  $h(Pd) = 0,21$ ;  $h(Ei) = 0,53$

sujeito a:

$$g(E_{\alpha=0,10}) = g(V) = 1$$

$$g(E_{\alpha=0,14}) = \{V\} - \{Ed\} = \{Sz, Pd, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,10}) = g(\{Sz, Pd, Ei\}) = 0,986$$

$$g(E_{\alpha=0,21}) = \{V\} - \{Ed\} - \{Sz\} = \{Pd, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,21}) = g(\{Pd, Ei\}) = 0,79$$

$$g(E_{\alpha=0,53}) = \{V\} - \{Ed\} - \{Sz\} - \{Pd\} = \{Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,53}) = g(\{Ei\}) = 0,3$$

$$\int_F h \hat{\partial} g = \max [\min[h(Ed), g(V)], \min[h(Sz), g(Sz, Pd, Ei)], \min[h(Pd), g(Pd, Ei)], \min[h(Ei), g(Ei)]]$$

$$\int_F h \hat{\partial} g = 0,30$$

$$2. \quad h(Sz)=0,14; \quad h(Pd)=0,21; \quad h(Ed)=0,25; \quad h(Ei)=0,60$$

sujeito a:

$$g(E_{\alpha=0,14}) = g(V) = 1$$

$$g(E_{\alpha=0,21}) = \{V\} - \{Sz\} = \{Pd, Ed, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,21}) = g(\{Pd, Ed, Ei\}) = 0,979$$

$$g(E_{\alpha=0,25}) = \{V\} - \{Sz\} - \{Pd\} = \{Ed, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,25}) = g(\{Ed, Ei\}) = 0,93$$

$$g(E_{\alpha=0,60}) = \{V\} - \{Sz\} - \{Pd\} - \{Ed\} = \{Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,60}) = g(\{Ei\}) = 0,3$$

$$\int_F h \hat{\partial} g = \max [\min[h(Sz), g(V)], \min[h(Ed), g(Pd, Ed, Ei)], \min[h(Pd), g(Pd, Ei)], \min[h(Ei), g(Ei)]]$$

$$\int_F h \hat{\partial} g = 0,30$$

$$3. \quad h(Ed)=0,10; \quad h(Sz)=0,12; \quad h(Pd)=0,18; \quad h(Ei)=0,53$$

sujeito a:

$$g(E_{\alpha=0,10}) = g(V) = 1$$

$$g(E_{\alpha=0,12}) = \{V\} - \{Ed\} = \{Sz, Pd, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,12}) = g(\{Sz, Pd, Ei\}) = 0,986$$

$$g(E_{\alpha=0,18}) = \{V\} - \{Ed\} - \{Sz\} = \{Pd, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,18}) = g(\{Pd, Ei\}) = 0,79$$

$$g(E_{\alpha=0,53}) = \{V\} - \{Ed\} - \{Sz\} - \{Pd\} = \{Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,53}) = g(\{Ei\}) = 0,3$$

$$\int_F h \partial g = \max [\min[h(Ed), g(V)], \min[h(Sz), g(Sz, Pd, Ei)], \min[h(Pd), g(Pd, Ei)], \min[h(Ei), g(Ei)]]$$

$$\int_F h \partial g = 0,30$$

$$4. \quad h(Sz)=0,18; \quad h(Ed)=0,25; \quad h(Pd)=0,28; \quad h(Ei)=0,60$$

sujeito a:

$$g(E_{\alpha=0,18}) = g(V) = 1$$

$$g(E_{\alpha=0,25}) = \{V\} - \{Sz\} = \{Ed, Pd, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,25}) = g(\{Ed, Pd, Ei\}) = 0,979$$

$$g(E_{\alpha=0,28}) = \{V\} - \{Sz\} - \{Ed\} = \{Pd, Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,28}) = g(\{Pd, Ei\}) = 0,79$$

$$g(E_{\alpha=0,60}) = \{V\} - \{Sz\} - \{Ed\} - \{Pd\} = \{Ei\} \mid g(E_{\alpha=0,60}) = g(\{Ei\}) = 0,3$$

$$\int_F h \partial g = \max [\min[h(Sz), g(V)], \min[h(Ed), g(Pd, Ed, Ei)], \min[h(Pd), g(Pd, Ei)], \min[h(Ei), g(Ei)]]$$

$$\int_F h \partial g = 0,30$$

A etapa de formulação dos incrementos e decrementos, tem que ser cuidadosamente examinada, neste caso, convém lembrar que, numa aplicação onde o valor governante for originado do critério de importância, todos os escores são variações relevantes.

As Tabelas 13, 14, 15 e 16 apresentam, além dos valores de incrementos e decrementos o resultado calculado na Integral *Fuzzy* modificada.

**Tabela 13 - Cálculo dos decrementos e incrementos item 1**

Escore	h(vi)	Tipo	VR	g(E)	$\Delta^- / \Delta^+$
h(Ed)	0,10	DEC	-0,04	0,90	-0,036
h(Ei)	0,53	INC	+0,23	0,30	0,069
h(Sz)	0,14	DEC	-0,07	0,80	0,056
h(Pd)	0,21	DEC	-0,09	0,70	0,063
Integral modificada = $0,30 - 0,36 + 0,069 + 0,056 + 0,063 = 0,214$					

**Tabela 14 - Cálculo dos decrementos e incrementos item 2**

Escore	h(vi)	Tipo	VR	g(E)	$\Delta^- / \Delta^+$
h(Ed)	0,25	DEC	-0,05	0,90	-0,045
h(Ei)	0,60	INC	+0,30	0,30	0,09
h(Sz)	0,14	DEC	-0,07	0,80	0,056
h(Pd)	0,21	DEC	-0,04	0,70	0,028
Integral modificada = $0,30 - 0,045 + 0,09 + 0,056 + 0,028 = 0,261$					

**Tabela 15 - Cálculo dos decrementos e incrementos item 3**

Escore	h(vi)	Tipo	VR	g(E)	$\Delta^- / \Delta^+$
h(Ed)	0,10	DEC	-0,02	0,90	-0,018
h(Ei)	0,53	INC	+0,23	0,30	0,069
h(Sz)	0,12	DEC	-0,06	0,80	0,048
h(Pd)	0,18	DEC	-0,12	0,70	0,084
Integral modificada = $0,30 - 0,018 + 0,069 + 0,048 + 0,084 = 0,219$					

**Tabela 16 - Cálculo dos decrementos e incrementos item 4**

Escore	h(vi)	Tipo	VR	g(E)	$\Delta^- / \Delta^+$
h(Ed)	0,25	DEC	-0,03	0,90	-0,027
h(Ei)	0,60	INC	+0,30	0,30	0,09
h(Sz)	0,18	DEC	-0,07	0,80	-0,056
h(Pd)	0,28	DEC	-0,02	0,70	-0,014
Integral modificada = $0,30 - 0,027 + 0,09 - 0,056 - 0,014 = 0,293$					

Com base nos valores das tabelas, o decisor pode verificar qual é o fator de poluição mais crítico, relacionando os valores dos escores com os valores resultantes da fórmula.

À título ilustrativo, pode-se comparar na Tabela 17 os resultados que seriam obtidos usando-se apenas a metodologia da Integral *Fuzzy* tradicional.

**Tabela 17 - Matriz de avaliação dos diferentes valores atribuídos aos escores**

Critérios	Peso	Alternativas			
		1	2	3	4
1.Ed	0,9	0,92	0,92	0,52	0,52
2.Ei	0,3	0,79	0,79	0,60	0,60
3.Sz	0,8	0,83	0,40	0,40	0,25
4.Pd	0,7	0,66	0,66	0,66	0,66
Método original		0,90	0,90	0,66	0,66
Método Modificado		0,75	0,58	0,44	0,32
		5	6	7	8
5.Ed	0,9	0,81	0,18	0,18	0,18
6.Ei	0,3	0,25	0,80	0,80	0,81
7.Sz	0,8	0,72	0,22	0,60	0,60
8.Pd	0,7	0,81	0,37	0,72	0,37
Método original		0,81	0,80	0,80	0,81
Método Modificado		0,30	0,27	0,44	0,34

## 5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O método *Fuzzy* tradicional embora tenha uma estrutura mais simples de ser aplicada, não atende à solução ideal, pois acarreta uma perda de valores, no momento em que não contempla os escores, quando estes são variados em maior ou menor peso. Na Tabela acima, propôs-se permanecer os valores de importância e variar os escores. Observa-se que nas alternativas onde o peso dos escores são menores, por exemplo nos critérios Sz e a Pd, o valor resultante no método modificado também o é. Verificou-se pois que, a solução obtida com o segundo método corresponde aos melhores resultados, permitindo ocorrer tomada de decisão.

Quando aplica-se o método original, fica claro ver que o valor obtido na avaliação sintética será o mais conservativo possível, por consequência dos operadores mínimo e

máximo, indicando o mínimo o menor valor de saída, e o máximo, o maior valor dos mínimos de entrada da integral.

Com base nesta especificação, torna-se imprescindível o uso da integral modificada, a qual realiza uma avaliação sintética mais satisfatória e confiável, fundamentada no julgamento dos avaliadores.

## 6. CONCLUSÃO

Como matéria prima para os métodos de análise multicritério, as informações devem ser tratadas e bem estruturadas, é necessário definir padrões válidos, úteis e compreensíveis para os dados. Tal tarefa, não trivial, requer um processo de identificação dos especialistas no assunto a ser pesquisado.

A utilização do método das Integrais *Fuzzy* aparecem como uma técnica vantajosa para tratar este tipo de problema, devido a sua habilidade de deduzir e gerar respostas baseadas em fatos qualitativos, incompletos ou imprecisos, permitindo modelar o processo de conhecimento humano, possibilitando ao especialista avaliar cada um dos critérios de acordo com metas e objetivos.

Durante o levantamento bibliográfico, verificou-se uma preocupação dos estudiosos quanto à aplicação das técnicas de agregação multicritério sobre os aspectos intuitivos, empíricos, sociais, econômicos e políticos, tratando problemas considerados complexos de uma forma bastante usual, agregando valores substanciais às informações obtidas e empregando ferramentas de ponderação que gerem processos claros e simples.

A filosofia central dos métodos multicritério é a de que sempre haverá um fator humano participando no processo das decisões. Nunca será uma situação em que a decisão seja concebida apenas por técnicas. O objetivo é trazer um apoio ao tomador de decisões.

Em suma, o presente trabalho vem contribuir para o campo de tomada de decisão multicritério. Oferecendo a Integral *Fuzzy* uma vantagem em relação aos métodos usuais, permitindo o uso de informações empíricas, dando maior flexibilidade para a seleção e tratamento dos dados.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi observado neste trabalho que o modelo pode-se tornar mais eficiente; todavia o objetivo limitou-se em pesquisar as formas de agregação e apresentar o modelo computacional apenas como um exemplo de aplicação. Então, tem-se as seguintes sugestões:

- Desenvolver um sistema especialista de tomada de decisão, a partir do modelo obtido;
- Aplicar ao estudo de caso, a técnica da lógica *fuzzy*, na definição dos pesos dos critérios do problema;
- Utilizar o método da Integral *Fuzzy* para ponderar as classes dos planos de informação espacial na análise de dados espaciais (mapas).



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRETO, J. M. **Inteligência Artificial no Limiar do Século XXI**. Florianópolis/SC, 1999.

BORGES, P. S. S. **Adding Compensatory Terms in the Fuzzy Integral for Synthetic Evaluation of Multi-Attribute Alternatives**. Florianópolis/SC, 2002.

CAVINATTO, V. **Caracterização Hidrológica do Estado de Mato Grosso**. PRODEAGRO/SEPLAN/FEMA. Cuiabá/MT, 1995.

DUBOIS, D.; MARICHAL, J. L.; PADRE, H.; ROUBENS, M.; SABBADIN, R. **The Use of the Discrete Sugeno Integral in Decision-Making: A Survey**. outubro, 2000. Disponível em: <http://www.math.byu.edu/~marichal/Mywebpage/internetfiles/SugenoSurvey.pdf> Acesso em: março de 2002.

FEMA/MT. Fundação Estadual do Meio Ambiente de Mato Grosso. **Proposta de Enquadramento dos Principais Corpos de Água da Bacia do Rio Cuiabá**. FEMA/MMA/PNMA. Cuiabá/MT, 1997.

GALVÃO, C. O.; VALENÇA, J. S. **Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Sistemas Ambientais**. Porto Alegre/RS: Editora da Universidade do Rio Grande do Sul/ABRH, 1999.

GOMES, C. F. S.; GOMES, L. F. A. M. **A Função de Decisão Multicritério**. Parte I: Dos Conceitos Básicos à Modelagem Multicritério. Disponível em: <http://www.estacio.br/categorias/cursos/mestrado/mestrado/adm/made3/artigo4.htm>. Acesso em: março de 2002.

GOMES, L. A. **Levantamento da Carga Poluidora Afluente e Capacidade Autodepuradora do Rio Cuiabá**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Mato Grosso/UFMT. Cuiabá/MT, 1984.

GOMES, L. F. A. M. Da Informação à Tomada de Decisão: Agregando Valor Através dos Métodos Multicritério. **Revista de Ciência e Tecnologia/RECITEC**. v. 2, n. 2. Recife/PE, 1998. Disponível em:

<http://www.estacio.br/categorias/cursos/mestrado/mestrado/adm/made3/artigo7.htm> Acesso em: março de 2002.

INMET. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Boletim da Estação 2504600**. Delegacia Federal da Agricultura/DFA/MT. 9.º Distrito de Meteorologia, 2000.

JACKSON, P. C. **Introduction to Artificial Intelligence**. General Publishing Company Ltd., Canada, 1949.

LIBOS, M. **Modelagem da Poluição não Pontual na Bacia do Rio Cuiabá Baseada em Geoprocessamento**. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 2002.

LIMA, E. B. N. R. **Modelagem Integrada para Gestão da Qualidade da Água na Bacia do Rio Cuiabá**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 2001.

LIMA, J. B. **Impactos das Atividades Antrópicas Sobre a Comunidade dos Macroinvertebrados Bentônicos do Rio Cuiabá no Perímetro Urbano das Cidades de Cuiabá e Várzea Grande/MT**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos/SP. 147 pp., 2002.

LIMA, J. B.; RONDON LIMA, E. B. N. Avaliação das Cargas Orgânicas Poluidoras Lançadas no Rio Cuiabá pelas Principais Sub-Bacias da Cidade de Cuiabá/MT. In: **2.ª Reunião Especial da SBPC**. UFMT/SBPC. Cuiabá/MT, 1995.

MARICHAL, J. L. **On Choquet and Sugeno Integrals as Aggregation Functions**. University of Liège Boulevard du Rectorat 7 - B31, - 4000. Disponível em: <http://www.math.byu.edu/~marichal/ChoquetSugenoFunctions.pdf> Acesso em: julho de 2002.

MENTZAS<sup>1</sup>, G. **Intelligent Process Support for Corporate Decision Making**. University of Athens. Department of Electrical and Computer Engineering National Technical. Disponível em: <http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/17373/.pdf>. Acesso em: julho de 2002.

MENTZAS<sup>2</sup>, G. **Towards Intelligent Organisational Information Systems**. University of Athens. Department of Electrical and Computer Engineering. National Technical. Disponível em: <http://imu.iccs.ntua.gr/Papers/J18-itors.pdf> Acesso em: julho de 2002.

MUNAKATA, T. **Fundamentals of the New Artificial Intelligence: Beyond Traditional Paradigms**. Springer-Verlag-New York, 1998.

MUSIS, C. R. **Caracterização Climatológica da Bacia do Alto Paraguai**. Tese de Mestrado. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal de Mato Grosso/UFMT. Cuiabá/MT, 1997.

NEVES, I. F. **Diversidade da Comunidade Zooplancônica em Trechos do Rio Cuiabá Impactados por Atividades Antropogênicas**. Tese de Doutorado. Departamento de Biologia. Universidade Federal de São Carlos/UFSCAR. São Carlos/SP, 2002.

PORTO, R. L. L. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre/RS: Editora Universidade. 1997.

RICHARDS, D.; Mc DONALD, C. **Adapting Expert Systems to Behave Like Decision Support Systems**. 2002. Disponível em:

<http://citeseer.nj.nec.com/cache/papers/cs/10246/.expert-systems-to.pdf>. Acesso em: agosto de 2003.

RUDOLPHI, W. **Multi Criteria Decision Analysis as a Framework for Integrated Land use Management in Canadian National Parks**. School of Resource and Environmental Management. Report n. 258. USA, 2000.

RUSS, E.; DOBBINS, R.; SIMPSON, P. **Computational Intelligence**. PC Tools, This book is printed on acid-free paper. USA, 1996.

SIBAC. Sistema de Monitoramento Integrado da Bacia do Rio Cuiabá. **Relatório de Modelagem Integrada da Bacia do Rio Cuiabá**. PROPEP/UFMT, 2000.

SMOLÍKOVÁ, R. **Aggregation Operators for Selection Problems**. Institute for Research and Applications of Fuzzy Modeling University of Ostrava and Computer Science and Engineering Program – University of Louisville, USA, 2000.

TABACZENSKI, R. R. **Monitoramento e Análise Ambiental para Gestão de Áreas Especialmente Protegidas: Caso Parque Nacional de Chapada dos Guimarães.** Tese de Doutorado. São Carlos/SP, 2000.

TEIXEIRA, I. **Modelagem da Qualidade das Águas do Rio Cuiabá.** FEMA/PNMA. Cuiabá/MT, 1994.

TEIXEIRA, T. P. B. **Avaliação dos Desempenhos Operacionais e Econômicos dos Sistemas de Abastecimento de Água ou Esgotamento Sanitário, Através da Determinação de Indicadores Básicos Regionais, Ajustados aos Novos Conceitos de Modernização do Setor de Saneamento.** Monografia de Especialização em Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/DESA. Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá/MT, 1997.

VEIGA, M. M.; MEECH, J. A. **Application of Fuzzy Logic to Environmental Risk Assessment.** 1994. Disponível em <http://www.mining.ubc.ca/faculty/veiga/index2.htm>. Acesso em: novembro de 2002.

VERGARA, H. **Simulação Cognitiva da Tomada de Decisão em Situações Complexas: Modelagem do Raciocínio Humano por Meio de Casos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 1995.

WINSTON, P. H. **Artificial Intelligence.** 3 ed. Addison-Wesley, USA, 1992.

YAGER, R. R. Criteria Aggregations Functions Using Fuzzy Measure and the Choquet Integral. **International Journal of Fuzzy Systems.** v. 1, n. 2, dec., 1999. Disponível em: <http://www.fuzzy.org.tw/download/IJFS.pdf> Acesso em: março de 2003.

ZEILHOFER, L. V. A. C. **Estrutura das Comunidades Perifíticas de Testacea (Protozoa: Rhizopoda) na Avaliação de Impacto Orgânico no Rio Cuiabá: Perímetro Urbano.** Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/DESA. Universidade Federal de Mato Grosso. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 2002.

## ANEXO

### APLICAÇÃO NO MATLAB DO MÉTODO MULTICRITÉRIO INTEGRAL FUZZY

#### RESUMO

Um modelo computacional do método multicritério Integral Fuzzy (MMIF) foi desenvolvido no software Matlab – Version 6.1, por ser uma ferramenta de ordem científica e por possuir uma alta performance para trabalhar cálculos numéricos. O modelo contempla as suas duas formas (original e modificada). De características simples e de fácil aplicação, proporcionou o desembaraço no emprego das fórmulas, agilizando as várias fases que compreendem o processo.

#### INTRODUÇÃO

A idéia de desenvolver o modelo em módulos distintos, proporcionou a separação das etapas do processo, possibilitando comparar o resultado do método nas suas formas tradicional e modificada.

O modelo compreende as seguintes etapas: 1- Receber os valores de importância e escores dos critérios; 2- Gerar a classificação ordinal crescente dos escores; 3- Contemplar todas as combinações possíveis de importâncias, segundo o parâmetro  $E_{\alpha}$ ; 4- Substituir o resultado obtido em 3 no método tradicional; e 5 - Gerar os valores de incrementos e decrementos e relacioná-los ao método modificado.

#### OBJETIVO

Apresentar o modelo do método Integral *Fuzzy*, utilizado no capítulo Estudo de Caso desta dissertação.

## RESULTADOS

A Figura 1 representa o código em Matlab do módulo *Calcula\_Fzs.m*. Este observa a ordenação dos escores e permite realizar as possíveis combinações dos critérios envolvidos, produzindo todas as partições [mim (min(h(v), g(E)))]. Mostra o resultado no método tradicional.

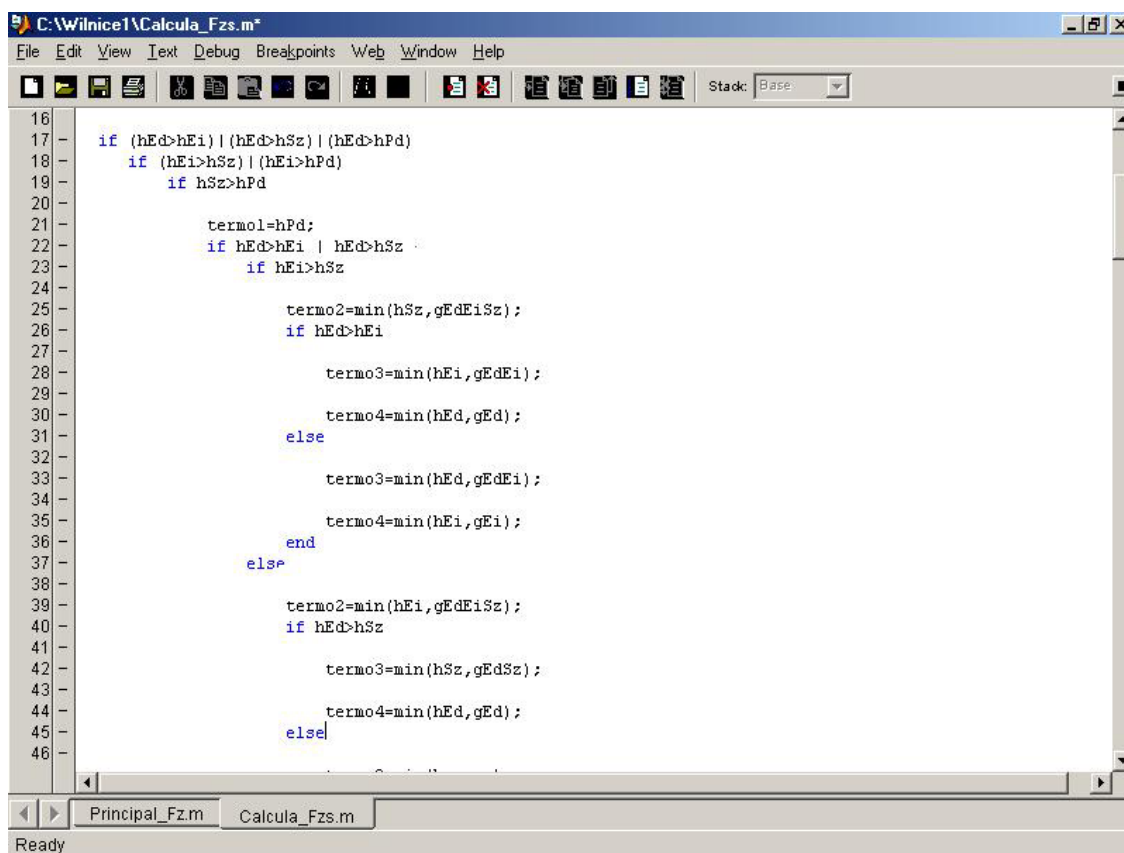
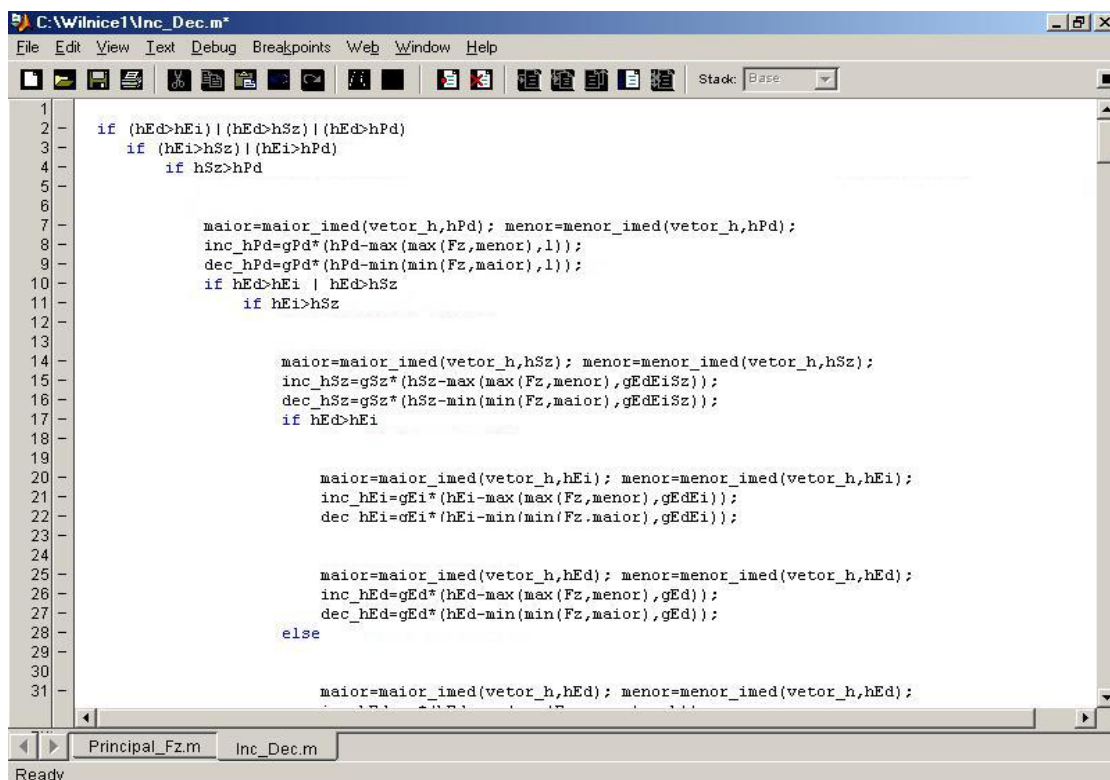


Figura 1- Código no Matlab do módulo *Calcula\_Fzs.m*

A Figura 2 representa o código em Matlab do módulo *Inc\_Dec.m*. Este módulo calcula quais os escores serão incrementos e decrementos no processo. Também gera todas as combinações dos escores (h(v)) com os seus respectivos conjuntos de importâncias (g(E)), sempre variantes em função do valor do menor escore dado.



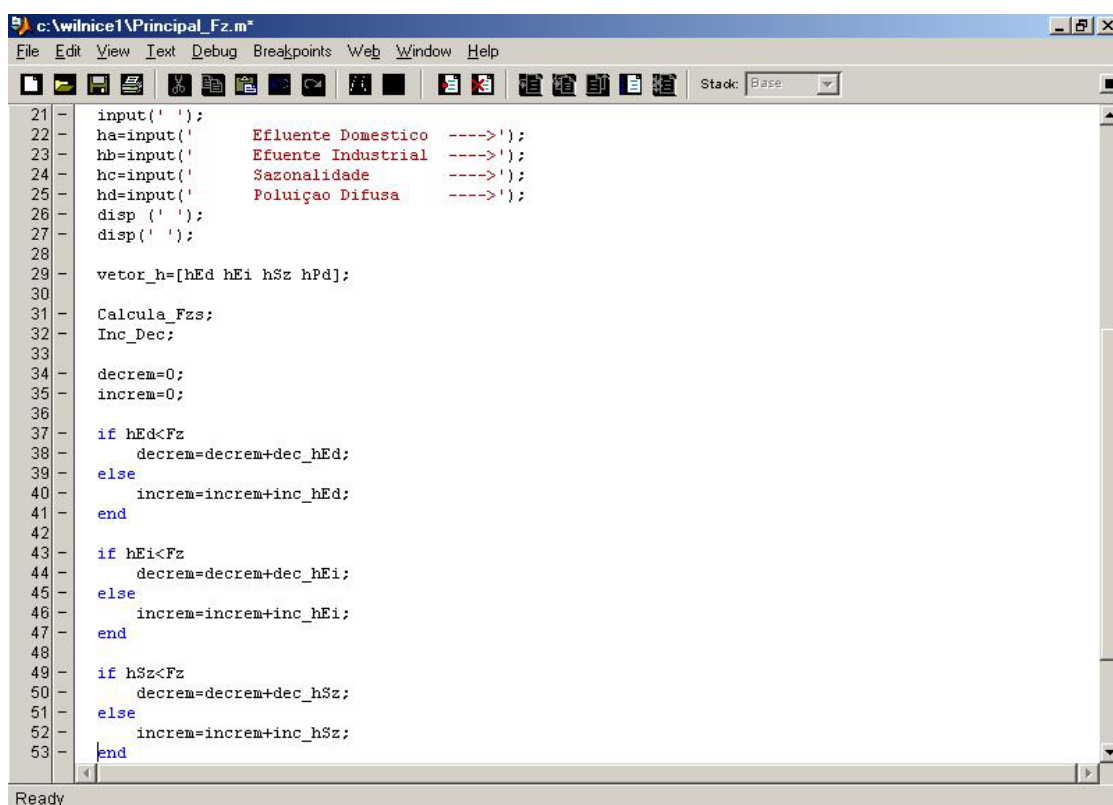
```

1  if (hEd>hEi) | (hEd>hSz) | (hEd>hPd)
2      if (hEi>hSz) | (hEi>hPd)
3          if hSz>hPd
4
5
6
7      maior=maior_imed(vetor_h,hPd); menor=menor_imed(vetor_h,hPd);
8      inc_hPd=gPd*(hPd-max(max(Fz,menor),1));
9      dec_hPd=gPd*(hPd-min(min(Fz,maior),1));
10     if hEd>hEi | hEd>hSz
11         if hEi>hSz
12
13
14     maior=maior_imed(vetor_h,hSz); menor=menor_imed(vetor_h,hSz);
15     inc_hSz=gSz*(hSz-max(max(Fz,menor),gEdEiSz));
16     dec_hSz=gSz*(hSz-min(min(Fz,maior),gEdEiSz));
17     if hEd>hEi
18
19
20     maior=maior_imed(vetor_h,hEi); menor=menor_imed(vetor_h,hEi);
21     inc_hEi=gEi*(hEi-max(max(Fz,menor),gEdEi));
22     dec_hEi=gEi*(hEi-min(min(Fz,maior),gEdEi));
23
24
25     maior=maior_imed(vetor_h,hEd); menor=menor_imed(vetor_h,hEd);
26     inc_hEd=gEd*(hEd-max(max(Fz,menor),gEd));
27     dec_hEd=gEd*(hEd-min(min(Fz,maior),gEd));
28 else
29
30
31     maior=maior_imed(vetor_h,hEd); menor=menor_imed(vetor_h,hEd);

```

Figura 2- Código no Matlab do módulo Inc\_Dec.m

A Figura 3 representa o código em Matlab do módulo *Principal\_Fzs.m*. Considera-se a tela principal do modelo, devolve o resultado das duas Integrais a partir das rotinas internas *Calcula\_Fzs.m* e *Inc\_Dec.m*.



```

21 input(' ');
22 ha=input(' Efluente Domestico ---->');
23 hb=input(' Efluente Industrial ---->');
24 hc=input(' Sazonalidade ---->');
25 hd=input(' Poluição Difusa ---->');
26 disp(' ');
27 disp(' ');
28
29 vetor_h=[hEd hEi hSz hPd];
30
31 Calcula_Fzs;
32 Inc_Dec;
33
34 decrem=0;
35 increm=0;
36
37 if hEd<Fz
38     decrem=decrem+dec_hEd;
39 else
40     increm=increm+inc_hEd;
41 end
42
43 if hEi<Fz
44     decrem=decrem+dec_hEi;
45 else
46     increm=increm+inc_hEi;
47 end
48
49 if hSz<Fz
50     decrem=decrem+dec_hSz;
51 else
52     increm=increm+inc_hSz;
53 end

```

Figura 3- Código no Matlab do módulo Principal\_Fzs.m

Figuras 4 e 5 mostram a tela do modelo multicritério IF realizada por *Principal\_Fzs.m*. A aplicação é bastante simples, executada no próprio software matemático. Quando em execução, aguarda até que o usuário digite os respectivos valores e pressione a tecla *enter*.

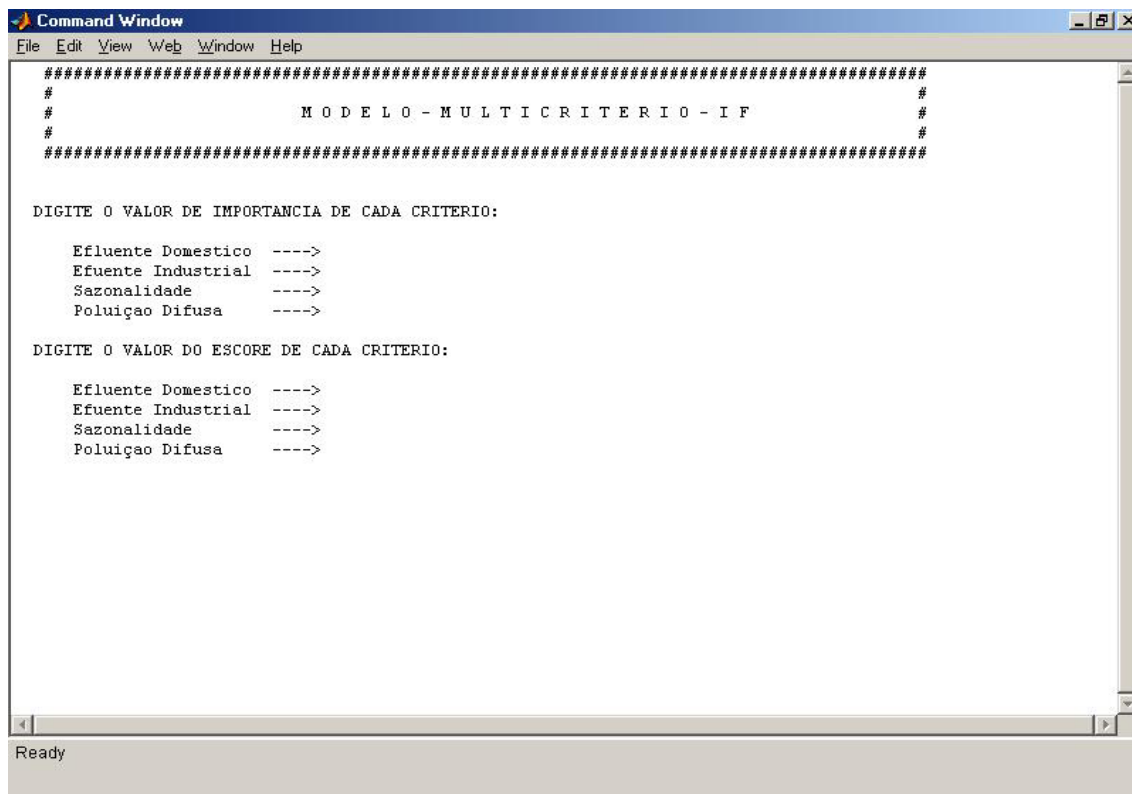


Figura 4- Janela principal do modelo

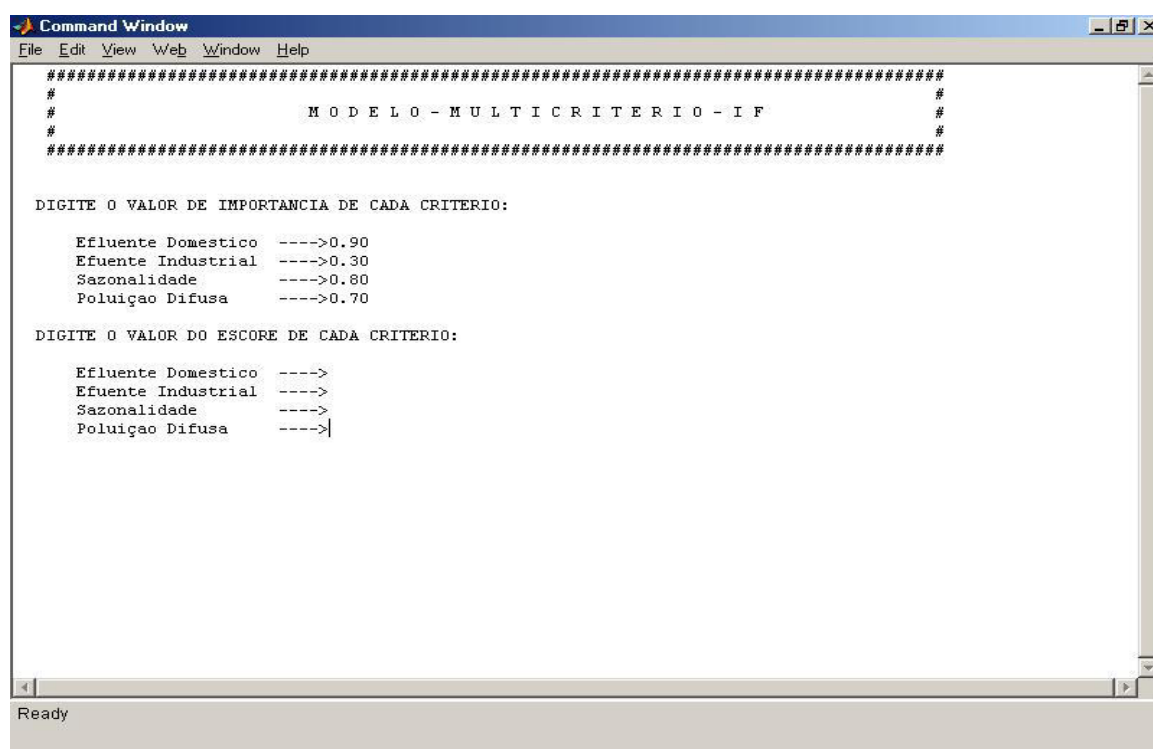
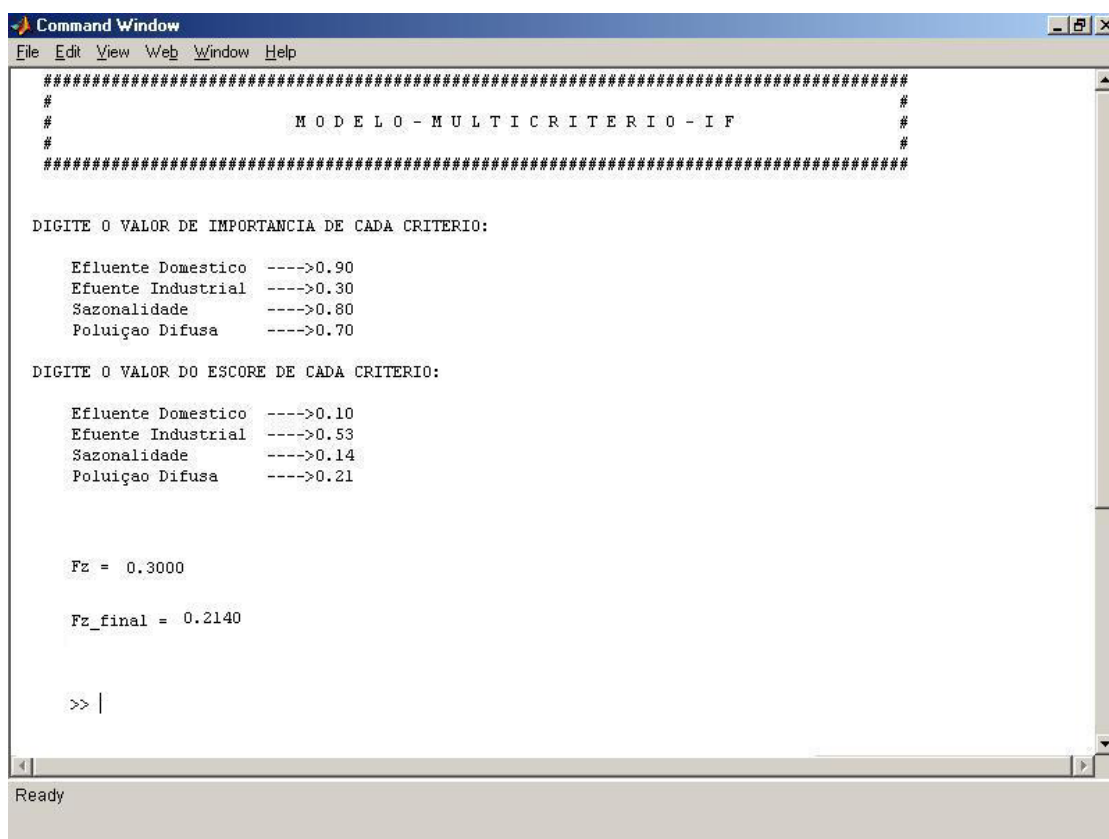


Figura 5- Entrada de dados no modelo



A Figura 6 apresenta um cálculo do modelo para efeito de exposição e comparação dos métodos.



```

Command Window
File Edit View Web Window Help

#####
#
#                               M O D E L O - M U L T I C R I T E R I O - I F
#
#####

DIGITE O VALOR DE IMPORTANCIA DE CADA CRITERIO:

Efluente Domestico ---->0.90
Efluente Industrial ---->0.30
Sazonalidade        ---->0.80
Poluição Difusa     ---->0.70

DIGITE O VALOR DO ESCORE DE CADA CRITERIO:

Efluente Domestico ---->0.10
Efluente Industrial ---->0.53
Sazonalidade        ---->0.14
Poluição Difusa     ---->0.21

Fz = 0.3000

Fz_final = 0.2140

>> |
Ready

```

**Figura 6- Os respectivos valores de entrada e os resultados nos dois métodos**

Na prática, o que se espera é um melhor entendimento do método Integral *Fuzzy* e a possibilidade de se fazer uma análise de sensibilidade dos resultados através das aplicações multicritérios.